

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**  
*Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique*

**Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou**  
*Faculté du génie électrique et de l'informatique*  
*Département d'électronique*



Mémoire

De fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme  
d'Ingénieur d'Etat En Electronique  
Option : Communication

# Thème

**Etude des méthodes du calcul de la fiabilité des  
réseaux de télécommunication**

Proposé et dirigé par :

*M<sup>r</sup> : ZIANI Rezkí.*

*Docteur Ingénieur*

Etudié par :

*M<sup>ELLE</sup> : Aít adí Samíra*

*M<sup>ELLE</sup> : Aít chekdhídh Hamída*

Promotion 2007/2008

## *Remerciements*

*Nos remerciements les plus spéciaux vont à notre promoteur Mr R. Ziani Docteur à l'université mouloud Mammeri de Tizi - Ouzou pour nous avoir encadrés et pour son soutien tout au long de la réalisation de mémoire, ainsi que la documentation qu'il a mis a notre disposition.*

*Mr.Lazri et Mr.Lahdir qui nous ont prodigué sans réserve avis conseils tout au long de notre travail et dont nous avons tiré de très grands profits, qu'ils trouvent ici l'expression de nos remerciements.*

*Que nos enseignants retrouvent le fruit du riche savoir qu'ils nous ont transmis avec rigueur et d'évènement, à eux tous nous éprouvons une intime reconnaissance.*

*Nous exprimons aussi nos remerciements aux membres de jury qui nous ferons honneur de juger notre travail.*

*Enfin nous adressons nos remerciements à tous ce qui de près ou de loin nous ont aidés de quelques façons que se soit à la réalisation de notre mémoire.*

# Dedicaces

*Je dédie ce modeste travail particulièrement à mon père et à ma mère à qui je ne saurais exprimer ma profonde gratitude pour tous les efforts qu'ils n'ont sans cesse ménagés pour me soutenir sur tous les plans et en tous moments durant toutes ces années.*

*A mes sœurs, Fairouz et Saloia, mes frères Hocine, Idir, Yougourthane.*

*A mes grands mères yema Nouara, Saadia, zahra, mon grand père.*

*A mes tantes et oncles et leurs familles en particulier Doudou, Hasna, Saïda, Noura, Nadia.*

*A tous mes amis (es), mon binôme et sa famille.*

*A tous ceux qui nous feront l'honneur de consulter ce mémoire ainsi à toute la promotion 2007-2008*

*Hamida*

# Dedicaces

*Je dédie ce modeste travail en particulier à mes chères parents à qui je ne saurais exprimer ma profonde gratitude pour tous les efforts qu'ils n'ont sans cesse ménagés pour me soutenir sur tous les plans pendant toutes ces années.*

*A mon chère fiancé qui a toujours su me soutenir dans les moments de joie comme de tristesse ainsi que sa famille.*

*A mes frères, Samir, Belaïde, et mes sœurs Zaina, Rima, Lylia, et Chahra.*

*A mes grands mères Zaina, djouhar .*

*A mes tantes et oncles et leurs familles en particulier nana Ldjida.*

*A tous mes amis (es), mon binôme et sa famille.*

*A tous ce qui nous feront l'honneur de consulter ce mémoire ainsi à toutes la promotion 2007-2008.*

*Samira*

# Sommaire

## Introduction générale

### Chapitre I

#### *Les réseaux de télécommunication et leur sûreté de fonctionnement*

<b>I .1 Introduction</b> .....	1
<b>I .2 Définition</b> .....	1
<b>I .2.1 Le réseau</b> .....	1
<b>I .2.2 La télécommunication</b> .....	1
<b>I .2.3 Réseau de télécommunication</b> .....	1
<b>I .3 Classification des réseaux de télécommunication</b> .....	2
<b>I .3.1 Classifications des Réseaux selon leur service</b> .....	2
<b>I .3.2 Classification des réseaux de télécommunication selon l'architecture technique</b> .....	3
<b>I .3.3 Classification des réseaux selon leur topologie</b> .....	4
<b>I .4 Les modes de transmission dans le réseau</b> .....	7
<b>I .5 Les éléments constitutifs d'un réseau</b> .....	7
<b>I .6 Le réseau téléphonique commuté RTC</b> .....	8
<b>I .6.1 Le réseau dorsal</b> .....	8
<b>I .6.2 Le réseau local</b> .....	10
<b>I .7 Modélisation du réseau</b> .....	12
<b>I .7.1 Le réseau d'interconnexion (RIC)</b> .....	12
<b>I .7.2 Modèle associé</b> .....	13
<b>I .7.3 Le routage</b> .....	14
<b>I .7.4 Type des pannes</b> .....	14
<b>I .8 Grandeurs de sûreté de fonctionnement</b> .....	15
<b>I .9 Méthodes d'analyse de la sûreté des systèmes</b> .....	17
<b>I .9.1 Evaluation stochastique</b> .....	17
<b>I .9.2 Les méthodes d'analyse</b> .....	18
<b>I .10 La fiabilité des réseaux</b> .....	22

### Chapitre II

#### *Les méthodes de calcul de la fiabilité*

<b>II .1 Introduction</b> .....	25
<b>II .2 Les méthodes de calcul de la fiabilité</b> .....	25
<b>II .2.1 Méthode fondée sur les chaînes de Markov</b> .....	25
<b>II .2.1.1 Principe de base</b> .....	25
<b>II .2.1.2 Algorithme chaîne –Markov</b> .....	29
<b>II .2.2 Méthode d'énumération des états</b> .....	32
<b>II .2.2.1 Énumération totale des états</b> .....	33
<b>II .2.2.2 Énumération partielle des états</b> .....	35
<b>II .2.3 Méthode des coupes et des chemins</b> .....	36
<b>II .2.4 Méthode de simplification de graphe</b> .....	38

## Chapitre III

### *Le reroutage*

III .1 Introduction.....	41
III .2 Sécurisation et reroutage .....	41
III .3 La stratégie de reroutage.....	42
III .4 Les sortes de reroutage selon le type de contrôle utilisé .....	43
III .4.1 Le reroutage centralisé .....	43
III .4.2 Le reroutage distribué.....	43
III .5 Les méthodes de reroutage .....	44
III .5.1 Les méthodes précalculées .....	44
III .5.2 Les méthodes dynamiques.....	44
III .6 Etapes principales des algorithmes de reroutage .....	45
III .7 Algorithme des plus courts chemins.....	46
III .7.1 Les algorithmes utilisant l'addition des valuations des arcs.....	46
III .7.1.1 Algorithme de Floyd.....	46
III .7.1.2 Algorithme de Bellman .....	48
III .7.1.3 Algorithme de Dijkstra .....	49

## Chapitre IV

### *Algorithme de recherche et de stockage des plus courts chemins*

IV .1 Introduction.....	52
IV .2.2 Algorithme de recherche et de stockage des plus courts chemins .....	52
IV .2.1 Principe général .....	52
IV .2.2 Programmation sous Delphi.....	56

*Conclusion générale.*

*Bibliographie.*

# Introduction générale

Un réseau de télécommunication est un système complexe, qui constitue un moyen pour véhiculer des informations de tout type (voix, données, etc....). La conception d'un réseau de télécommunication nécessite de prendre en considération le coût des infrastructures et la performance.

Mais la complexité de ces réseaux justifie pleinement l'apparition de nouvelles notions la fiabilité, la maintenabilité, la disponibilité, et la sécurité qui constituent ce que l'on nomme sûreté de fonctionnement des réseaux de télécommunication.

La sûreté de fonctionnement de ces réseaux caractérise leur aptitude à assurer la qualité des services offerts, et cela, en dépit des pannes ou interruptions qui peuvent l'affecter. La sûreté de fonctionnement dans le domaine des réseaux de télécommunication, souvent appelée fiabilité ou sécurisation, est de plus en plus pris en considération.

L'étude du comportement d'un réseau, quand certains de ses composants sont sujets à des défaillances aléatoires, est traitée par la théorie de la fiabilité. La mesure de la fiabilité la plus largement étudiée est la probabilité qu'à un instant donné deux nœuds puissent communiquer entre eux.

Le problème de calcul de ce type de mesure est appelé problème de la connexité stochastique, car le réseau est modélisé par un graphe dont les sommets correspondent aux centres de commutation et les arcs aux liaisons entre ces centres, une probabilité de défaillance est associée à chaque arc et à chaque sommet.

L'objectif de notre travail est l'étude des méthodes de calcul de la fiabilité des réseaux.

L'étude de cette question, nous a incités d'abord, à cerner les réseaux de télécommunication et leur sûreté de fonctionnement ce qui est illustré dans le premier chapitre.

Dans le deuxième chapitre nous nous sommes intéressés à l'étude des méthodes d'évaluation de la fiabilité des réseaux. Ensuite dans le troisième chapitre nous avons étudié le reroutage.

La programmation de l'algorithme de recherche et de stockage des plus courts chemins en nombre d'arcs fera l'objet du quatrième chapitre. Enfin nous terminons notre travail par une conclusion générale.

# Chapitre I :

*Les réseaux de  
télécommunications et  
leur sûreté de  
fonctionnement*

## **I. 1 Introduction :**

Différentes informations peuvent être acheminées sur les réseaux de télécommunications. Historiquement, chaque application a vu se développer un réseau spécifique, les réseaux télégraphiques transmettant des textes (automatisés plus tard sous la forme du télex qui a en particulier introduit la fonction de commutation), puis les réseaux téléphoniques transmettant la voie et les données.

Le développement de l'électronique, puis de l'optoélectronique, a permis l'extension de ces réseaux, la notion la plus importante de ces derniers est leur fiabilité. Elle est parfois appelée "sécurisation de réseau" ou "protection de réseau", elle indique la capacité du réseau à assurer une disponibilité des services offerts, et cela malgré les pannes ou interruptions qui peuvent affecter ses constituants.

## **I. 2 Définition :**

- ✓ **Le réseau:** Ensemble d'équipements techniques de commutation et de transmission destinés à la transmission filaire (câble ou fibre) ou radio électrique (ondes électromagnétiques) de signaux entre un point d'émission et un ou plusieurs points de réception.
  
- ✓ **La télécommunication:** La télécommunication est la communication à distance d'un service (téléphonie, télécopie, Internet) entre deux usagers au moins (homme, machine) échangeant des informations (voix, données, images...) via un terminal tels que le téléphone ou le fax. Le seul moyen de permettre économiquement à tout usager d'être mis en communication avec un autre est de rattacher le terminal à un réseau de télécommunication. Le rôle du réseau sera alors d'établir une liaison à la demande d'un usager connecté au réseau.
  
- ✓ **Réseau de télécommunication :** Représente l'ensemble des moyens mis en oeuvre pour permettre à des usagers distants d'échanger entre eux des informations avec un délai aussi court que possible.

## **I. 3 Classification des réseaux de télécommunication :**

### **I .3.1 Classifications des Réseaux selon leur service :**

- **Les réseaux publics:** Fournissent des accès et des services accessibles à tous. Ils se caractérisent par leur vaste étendue et leur grande taille. Le plus important des réseaux publics est le réseau téléphonique commuté (RTC), réseau conversationnel transmettant la parole.

Ces réseaux se distinguent selon les services qu'ils supportent:

PSTN: Public Switched Telecom Network (le réseau téléphonique).

PDN: Public Data Network.

PLMN: Public Land Mobile Network (GSM).

- **Les réseaux privés:** Utilisent certaines ressources de transmission (circuits loués). Ils sont multipliés pour répondre à la diversification de la demande et sont de taille plus faible par rapport à celle des réseaux publics.

Pour les réseaux téléphoniques, chaque site est desservi par un commutateur téléphonique privé, le PABX [Private Automatic Branch Exchange] qui est de type numérique.

Le réseau privé peut disposer de ses propres commutateurs de paquets ou ATM (Asynchronous Transfert Mode), technique temporelle asynchrone qui est une partie de la catégorie des réseaux locaux. En fait c'est la première technologie qui a pu intégrer les réseaux LAN, MAN, WAN. On distingue ces réseaux selon leur taille :

**LAN (Local Area Network):** Réseau local, peut s'étendre de quelque mètre à quelque kilomètre, ils correspondent par leurs tailles aux réseaux intra entreprises et permettent l'échange de données informatiques ou le partage de ressources.

**MAN (Metropolitains Area Network):** Ils permettent l'interconnexion de plusieurs sites à l'échelle d'une ville, par exemple les différentes sites d'une université ou d'une administration, chacun possèdent son propre réseau local.

**WAN (Wide Area Network):** c'est un réseau d'opérateurs qui assure la transmission des données numériques sur des distances à l'échelle d'un pays ou de la planète entière. Le support utilisé peut être terrestre (réseau téléphonique ou spécialisé) ou hertzien (transmission par satellite).

Donc l'usage d'un réseau privé est limité en principe à des usagers de l'entreprise mais ils sont connectés aux réseaux publics pour permettre évidemment à l'entreprise d'accéder au monde extérieur.

**I. 3.2 Classification des réseaux de télécommunication selon l'architecture technique:** La classification peut se faire selon l'architecture et la technique utilisée pour transférer l'information, on distingue généralement :

❖ **Les réseaux commutés (Switched Network):** L'information est transmise depuis le terminal de départ jusqu'au terminal d'arrivée à travers une série de nœuds connectés entre eux par des liaisons de transmission, Chaque nœud agit comme un aiguillage actionné sur la base de l'adresse du destinataire.

Les réseaux commutés sont subdivisés en:

✓ **Réseau à commutation de circuit (circuit switched network) :** Avant d'effectuer une communication entre deux entités, il est établi un circuit à travers lequel, les informations transitent. Le circuit est libéré dès que les deux abonnés décident d'interrompre la communication, et mettent fin à la transmission des données. Elle est appliquée dans le réseau téléphonique commuté RTC.

Le problème qui se pose est de pouvoir réserver des ressources (mémoires, files d'attente, etc.) dans le cas où plusieurs communications utilisent la même liaison c'est-à-dire le même circuit.

✓ **Réseau à commutation de message :** Consiste à envoyer un ensemble d'information (message) d'un émetteur vers un récepteur en passant par un ou plusieurs nœuds de commutation, chacun de ces nœuds attend la réception complète du message avant de le réémettre.

- ✓ **Réseau à commutation de paquets** : Celle ci reprend la méthode précédente, mais en découpant le message en un nombre de fragments défini. Chaque nœud redirige ces fragments selon ses propres lois (table de routage).
- ✓ **Réseau à commutation de cellule** : C'est une commutation de paquets particulière, dans ce cas la taille d'un paquet est fixée à 53 octets. Cette technique est utilisée dans les réseaux à haut débit ATM (Asynchronous Transfer Mode), pour une connexion en mode connecté via un chemin fixe pour toutes les cellules. Elle a pour avantage de simplifier le travail des commutateurs et d'autoriser des débits les plus élevés.
- ❖ **Réseau de diffusion**: Les réseaux de diffusion les plus connus sont :
  - Réseau radio par paquet.
  - Réseau satellite local (LAN) et métropolitains (WAN).
  - Réseau de TV.
- ❖ **Réseau cellulaire**: C'est un réseau à commutation de cellule dont la transmission se fait par onde électromagnétique, utilisé dans les systèmes radio mobile (GSM).

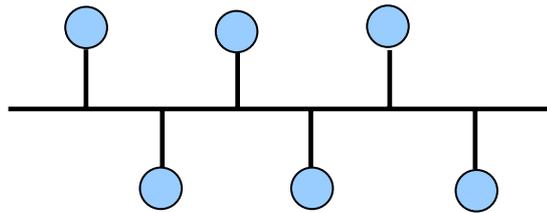
### I. 3.3 classification des réseaux selon leur topologie :

La topologie caractérise la façon dont les différents nœuds du réseau sont interconnectés entre eux.

- **La topologie en bus** : Elle utilise un seul medium de transmission, dans ce mode de liaison, l'information émise par une station est diffusée sur tous le réseau avec une en-tête identifiant l'émetteur et le récepteur.

Dans ce type de liaison chaque station accède directement au réseau, d'où des problèmes de conflit d'accès, pour cela la principale méthode de contention utilisée est la CSMA/CD (Carrier Sense Method Access/ Collision Detection) qui consiste à écouter le canal avant et pendant l'émission d'une station afin de détecter une éventuel collision, dans ce cas une suite de bits dits de "bourrages" sont émit pour prévenir l'ensemble de réseau.

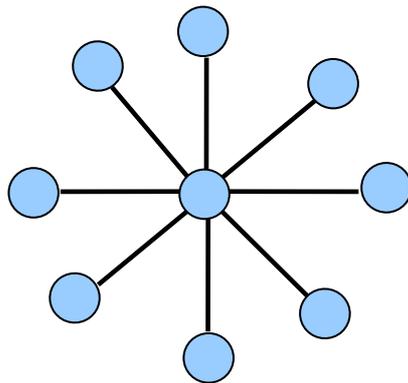
Dans ce type de topologie la panne d'un nœud ne met pas en cause l'ensemble de réseau par contre la panne du bus provoque celle de réseau



**Figure I.1** Topologie en bus

- **La topologie étoile :** Toutes les stations sont reliées à un seul composant central (concentrateur). Quand une station émet vers le concentrateur, celui-ci envoie les données à toutes les autres.

Elle correspond, par exemple, au réseau téléphonique privé d'une entreprise ou le commutateur téléphonique met en relation les différents postes téléphoniques de l'installation. Cette topologie autorise des dialogues interneud très performant, la défaillance d'un poste n'entraîne pas celle de réseau, cependant le réseau est très vulnérable à celle du nœud central.



**Figure I.2** Topologie en étoile

- **La topologie en arbre :** C'est une combinaison de la topologie en étoile et en bus, dans cette configuration chaque équipement appartenant à une étoile forme un sous réseau.

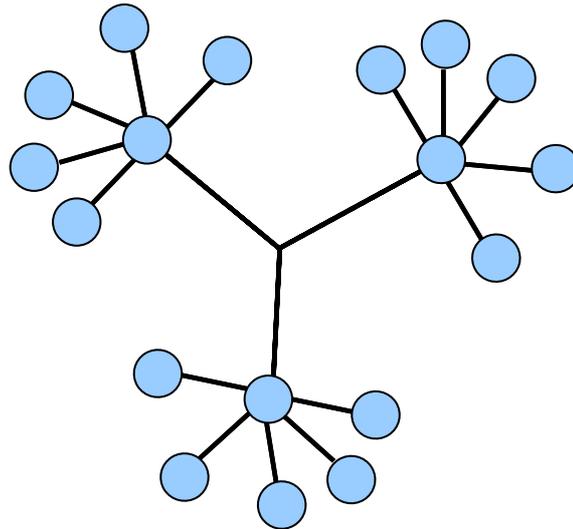


Figure I.3 Topologie en arbre

- **La topologie en anneau :** Dans cette topologie les stations sont reliées entre elles pour former une boucle, l'ordre d'accès au réseau se fait grâce à un jeton électronique, les informations circulent de stations en stations, en suivant l'anneau. Un jeton circule autour de l'anneau, la station qui a le jeton émet des données qui font le tour de l'anneau. Lorsque les données reviennent, la station qui les a envoyées les élimine du réseau et passe le jeton à son voisin, et ainsi de suite...

Le plus grand problème de cette topologie est que la panne d'une station rend l'ensemble de réseau inutilisable.

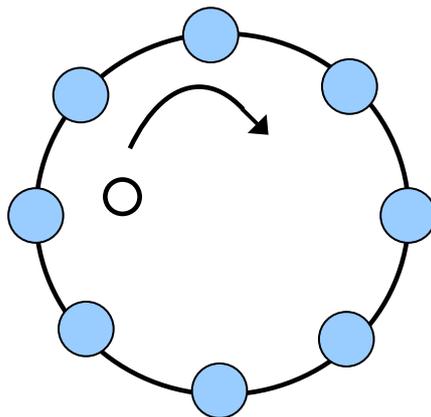


Figure I.4 Topologie en anneau

## I. 4 Les modes de transmission dans le réseau :

On distingue deux classes : celle en mode de diffusion et celle en mode point à point.

- **Mode de diffusion :** Chaque message envoyé par un équipement sur le réseau est reçu par tous les autres, chaque équipement détermine si le message lui est adressé ou pas par l'adresse spécifique au message. Il est adapté dans les réseaux locaux sur une architecture en bus, étoile ou anneau et les réseaux satellites ou radio.
- **Mode point à point :** Le support physique (câble) relie une paire d'équipement seulement, quand deux éléments non directement connectés entre eux veulent communiquer ils le font par l'intermédiaire des autres nœuds du réseau.

## I. 5 Les éléments constitutifs d'un réseau :

Le réseau est constitué des éléments fondamentaux suivants :

- ✓ **Les équipements terminaux :** Ils permettent à l'utilisateur d'accéder au réseau, et transforment les informations à communiquer sous forme de signaux électriques pour permettre leur transmission. Comme le poste téléphonique, la téléimprimante pour les services télégraphique ou télex, on trouve aussi des terminaux vidéotex, des consoles alphanumériques, etc.
- ✓ **Les lignes de transmission :** Elles transportent l'information mise sous forme de signaux électriques. On distingue les lignes d'abonné et les circuits.

**Les lignes d'abonné :** Ce sont les lignes qui relient le terminal à son commutateur de rattachement.

**Les circuits et les artères de transmission :** Ce sont les lignes reliant les commutateurs entre eux. La différence essentielle avec une ligne d'abonné est que cette dernière est à l'usage exclusif d'un seul abonné tandis que les circuits sont à la disposition de tous les usagers.

Une autre différence réside dans la longueur des circuits qui peut atteindre plusieurs centaines de kilomètres, et aussi dans le nombre de circuits existant sur un même trajet, qui peut atteindre plusieurs dizaines de milliers pour les grands axes.

Les techniques employées sont différentes, elles comprennent des dispositifs de multiplexages. Ces dernières permettent de regrouper sur un même support (paire coaxiale par exemple) de nombreux circuits. On constitue ainsi des artères de transmission qui sont des câbles aériens ou souterrains composés de plusieurs paires coaxiales.

- ✓ **Les commutateurs :** Ils aiguillent la communication dans la direction de l'abonné demandé, ils ont aussi le rôle de contraction de trafic afin de rentabiliser au mieux les artères de transmission.

## **I. 6 Le réseau téléphonique commuté RTC :**

Le réseau téléphonique est constitué de deux réseaux : le réseau dorsal et le réseau local.

- ❖ **Le réseau dorsal :** Est constitué des centres de commutation et des systèmes de transmission.
- ✓ **Les centres de commutation :** On distingue deux grandes classes de commutateurs (centres) :
  - **Les centres d'abonnés :** Sont les centres qui permettent le rattachement des abonnés. Ils sont de deux types:
    - Les centres à autonomie d'acheminement CAA :** Qui sont capables d'analyser les numéros qu'ils reçoivent et les traduire en un itinéraire parmi ceux possibles pour acheminer la communication vers l'abonné demandé.
    - Les centres locaux CL :** Qui ne sont pas capables d'analyser la numérotation ou ils sont seulement capables d'analyser les numéros des abonnés qu'ils desservent, leur rôle se limite à la concentration, on les appelle aussi centres auxiliaires.
  - **Les centres de transit :** Permettent de connecter les commutateurs qui n'ont pas de liaison entre eux. Ceci permet d'avoir un réseau étoilé plus facile à gérer et moins onéreux. Les centres de transit sont aussi différenciés en deux types, les centres de transits secondaires et les centres de transits principaux. Les centres de transit permettant de connecter les réseaux de deux pays sont appelé centres de transit internationaux.

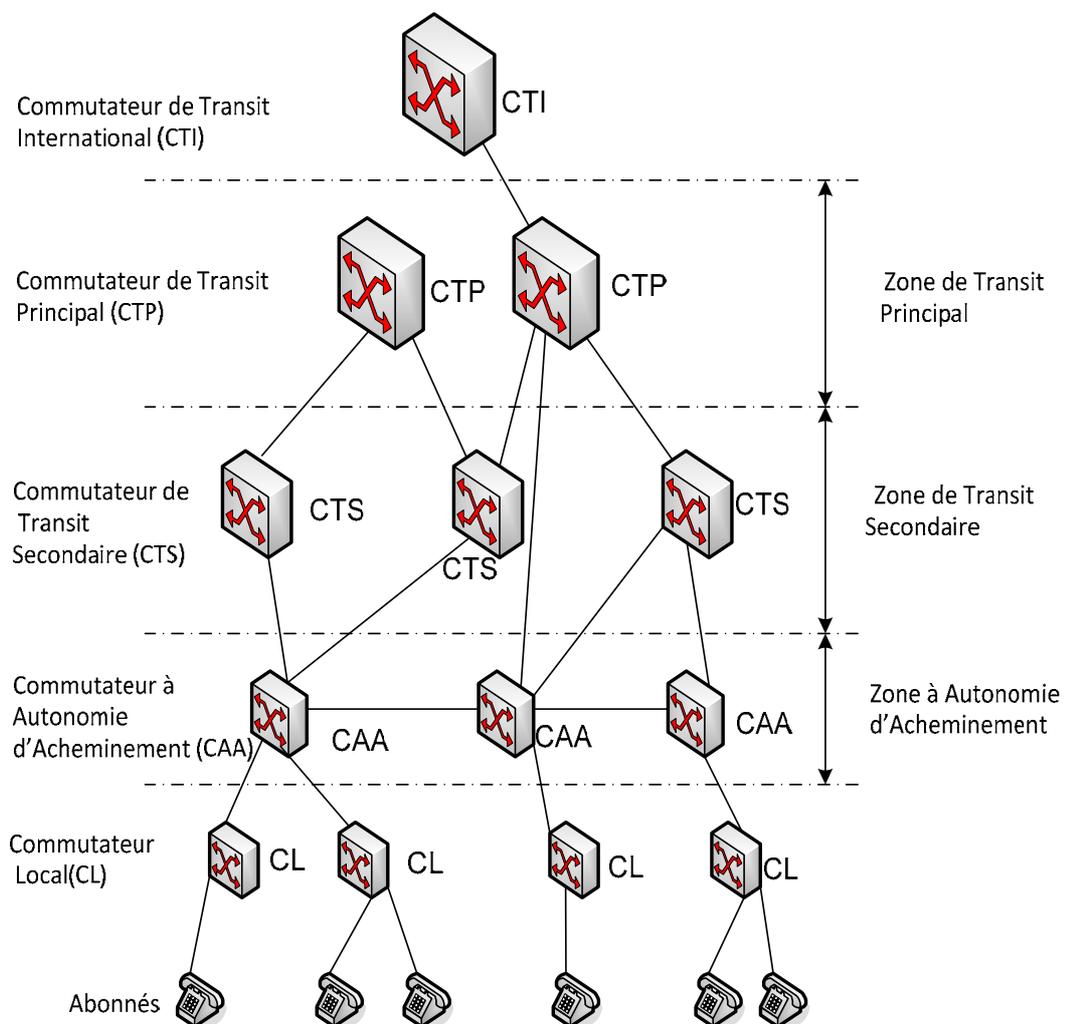
Le réseau est découpé en zones :

**Zone locale (ZL) :** C'est la zone desservie par un centre local.

**Zone à autonomie d'acheminement (ZAA) :** C'est la zone desservie par un centre à autonomie d'acheminement. Une ZAA qui englobe plusieurs CAA est dite zone à autonomie d'acheminement multiple ZAAM.

**Zone de transit secondaire ZTS :** C'est la zone desservie par un centre de transit secondaire.

**Zone de transit principale ZTP :** C'est la zone desservie par un centre de transit principal.



**Figure I. 5** La structure du réseau RTC

- ✓ **La transmission** : Le réseau de transmission relie entre eux les différents commutateurs et fournit les ressources (systèmes et support) pour transporter le trafic entre les commutateurs.

Dans le central téléphonique, on trouve un centre de transmission qui est relié à un ou plusieurs autres centres de transmission par des lignes appelées circuit ou jonction.

Pour fournir la capacité de transport nécessaire, plusieurs circuits sont utilisés et on parle de faisceau de circuit.

Avec la numérisation et le multiplexage, un seul circuit peut transporter plusieurs communications téléphoniques. Une ligne ayant un débit de 2 Mb/s transporte 30 communications.

Les médias de transmission utilisés sont le cuivre (paires torsadées, câble coaxial), la fibre optique et les faisceaux hertziens. La tendance actuelle va vers la fibre optique qui offre une capacité et une qualité de transmission élevée ainsi qu'une portée bien supérieure à celle du cuivre.

- ❖ **Le réseau local** : Le réseau local ou réseau périphérique est constitué essentiellement de :
- **le poste téléphonique**
  - **les lignes d'abonnés** : Qui sont constituées de paire de cuivre de diamètre 0.4 à 0.6 mm. La ligne téléphonique aussi appelée boucle locale relie le poste téléphonique de l'abonné au commutateur d'entrée.
  - **Les câbles de branchement** : Ce sont des lignes bifilaires individuelles.
  - **Les points de concentration PC** : Ce sont des petites boîtes placées sur des poteaux ou dans des endroits réservés au sein des immeubles desservis. Les paires téléphoniques arrivent au PC sur des réglettes, des connexions amovibles les relient à d'autres réglettes sur lesquelles sont branchés les câbles de distribution. Le PC n'est rien d'autre qu'un mini répartiteur de petite capacité d'une à quelques dizaines de paires.
  - **Les câbles de distributions** : Relient les points de concentration au sous répartiteurs, ces câbles peuvent être soit aériens, soit posé sur terre (moins onéreux mais vulnérables) soit en canalisations souterraines équipées de regards de visite pour l'entretien.
  - **Les sous répartiteurs SR** : ce sont des casiers placé sur les territoires, permettent de la même façon qu'un PC de regrouper les câbles de distribution vers les câbles de transport qui sont plus volumineux. Un SR peut connecter jusqu'à 1500 paires.

- **Les câbles de transport** : Sont similaires aux câbles de distribution avec des capacités plus élevée, 112 à 2688 paires. Ces câbles sont posés dans des conduites souterraines.
  
  - **Le répartiteur général** : Constitue le point d'accès des lignes à l'autocommutateur.
- **La boucle locale** : La boucle locale est la partie comprise entre le client et le centre de rattachement de réseau.

On distingue trois zones essentielles :

- La partie « **Branchement** »
- La partie « **Distribution** »
- La partie « **Transport** »

#### **La partie « Branchement » :**

C'est la partie reliant les clients aux points de concentration. Ces liaisons sont réalisées avec des câbles en cuivre. Une ligne est composée d'une paire de fils transmettant la voix et les données sous forme de fréquences.

La connexion n'est pas toujours possible par câble .Par exemple, en zone montagneuse, on utilise la transmission radio. Des équipements émettent et reçoivent les communications par faisceau hertzien : c'est la boucle locale radio.

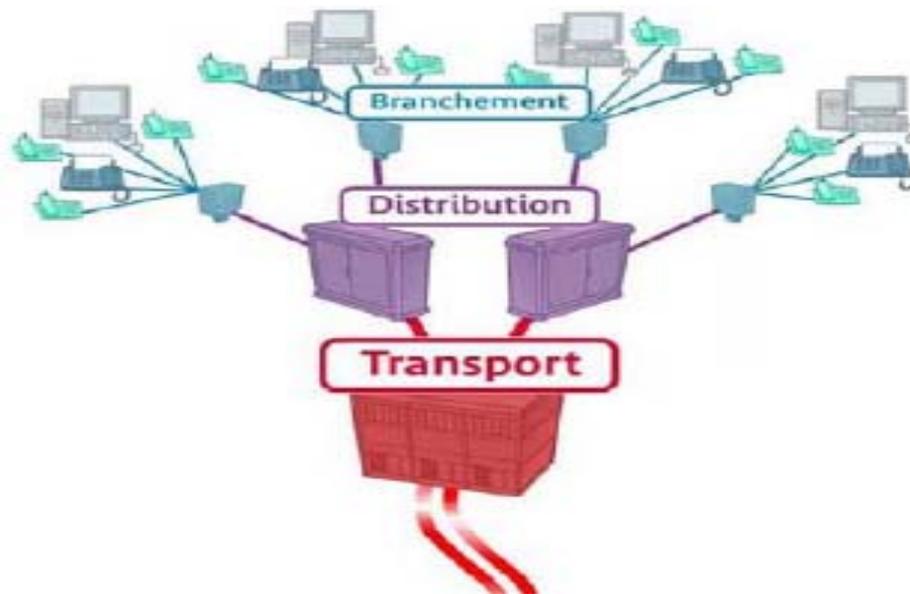
#### **La partie « Distribution » :**

C'est la partie des câbles de moyenne capacité, qui relie les points de concentration à un sous répartiteur.

#### **La partie « Transport » :**

La partie transport, est la partie qui connecte chaque sous répartiteur à un répartiteur via un câble de forte capacité. Chaque paire de cuivre correspondant à un client est reliée au répartiteur (jusqu'à une distance de quelque Km).

Le répartiteur qui centralise les branchements de tous les clients, collecte les flux d'information venant des abonnés, et communique avec le Commutateur Autonome d'Acheminement (CAA).Chaque client est donc relié à un CAA via le répartiteur.



VERS CAA

Figure I.6 La boucle locale

## I. 7 Modélisation du réseau :

La conception d'un réseau est principalement basée sur l'élaboration d'une architecture encore appelée topologie, permettant de satisfaire des exigences diverses telle que le volume de trafic à écouler, les délais de transmission et le mode d'acheminement ou routage.

Les deux éléments de base d'un réseau étant les nœuds qui le composent et les arcs qui relient ces nœuds, la topologie support permet de faire communiquer tous les nœuds avec des degrés de performances divers, dépendant de la capacité du réseau à satisfaire les exigences souhaitées par l'utilisateur final, ou les contraintes imposées par l'environnement.

### I. 7.1 Le réseau d'interconnexion (RIC) :

Le réseau d'interurbain encore appelé réseau d'interconnexion, ou réseau relie les pôles (centre de commutation) entre eux, à travers des artères de transmission, ces pôles peuvent être des CTP, CTS ou des C L. Ces réseaux font partie de la famille des grands réseaux (environ une centaine de nœuds) et présentent une structure fortement maillée (environ une centaine d'artères).

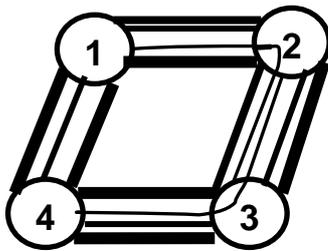
La majeure partie de ce réseau est constituée de câbles coaxiaux et de faisceaux hertziens, ces techniques sont supplantées aujourd'hui par la transmission sur fibre optique. Cette

dernière améliore essentiellement la qualité de transmission (grande portée de transmission) et permet d'exploiter une largeur de bande plus importante (le débit maximal atteint 2,5 Gbits/s contre 140Mbits/s pour la génération précédente).

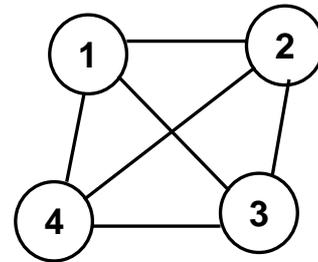
### I. 7.2 Modèle associé :

On peut représenter le réseau par un modèle constitué de deux couches : une couche physique et une couche logique

- **Couche physique** : Appelée réseau physique ou réseau génie civil, il est représenté par des nœuds et des artères, un arc de ce réseau correspond à une artère de transmission.
- **Couche logique** : Appelée réseau logique, un arc de ce réseau qu'on appelle arc système est établi entre deux nœuds.



Artère



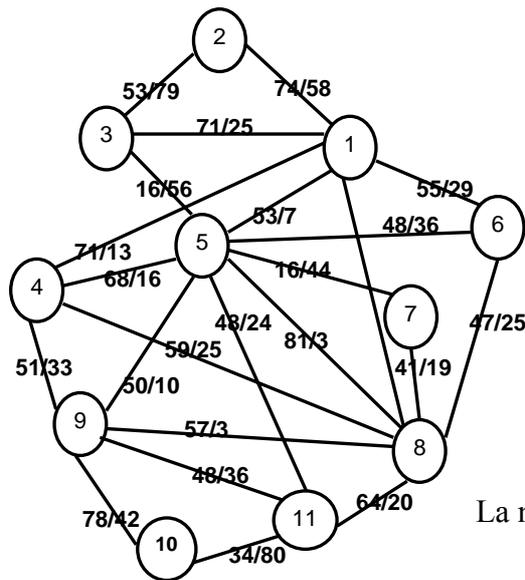
Arc système

Figure I.7 Réseau physique + réseau logique

Figure I.8 Réseau logique

Chaque arc système est constitué d'un ensemble de systèmes de transmissions ayant une capacité totale divisée en deux : une capacité utilisée et une capacité résiduelle

- **La capacité utilisée** : C'est la capacité utilisée par le trafic sur cet arc.
- **La capacité résiduelle** : C'est la capacité disponible ou libre, dédiée à la protection du réseau. L'ensemble des capacités résiduelles de tous les arcs systèmes constitue le réseau de réserve.



La notion "chiffre1/chiffre2" sur un arc.  
 Chiffre 1 : capacité utilisée  
 Chiffre 2 : capacité résiduelle

**Figure: I.9** réseau logique avec capacités

### I. 7.3 Le routage :

Le routage consiste à choisir pour chaque demande de trafic une ou plusieurs routes dans le réseau, une route encore appelée "chemin" correspond à un ensemble d'arcs système (nombre d'arcs systèmes) situe entre le nœud origine et le nœud extrémité de la demande.

Une demande en communication dans le réseau est caractérisée par un couple de nœuds (le nœud origine et le nœud extrémité) et par une quantité de trafic écoulé, l'ensemble des demandes pour chaque couple de nœuds constitue « la matrice de trafic ».

Les demandes sont généralement affectées d'un ordre de priorité, la demande la plus prioritaire étant la première à être prise en compte en cas de panne du réseau mais dans notre étude les demandes sont traitées de même façon.

**I. 7.4 Type des pannes :** Des pannes ou interruption peuvent affecter les constituants du réseau, ce sont des perturbations inhérentes aux matérielles, due a des évènements extérieurs ou engendré par des travaux de maintenance.

Trois types de pannes peuvent survenir :

- ✓ **Les pannes systèmes :** Sont provoquées par la défaillance des cartes électroniques, une panne système affecte toute sa capacité.
- ✓ **Les pannes d'artères :** Sont moins fréquentes mais plus graves, car elles coupent plusieurs systèmes de transmission à la fois, et nécessitent un temps de réparation beaucoup plus long, une panne d'artère affecte tous les systèmes empruntant cette artère.
- ✓ **Les pannes de nœuds :** Dites totales (incendie, inondation, etc) sont exceptionnelles mais très graves, car elles peuvent isoler entièrement une ville, une panne de nœud affecte tous les systèmes liés à ce nœud.

Dans la réalité une panne peut être totale ou partielle :

- ◆ **Panne totale :** Un composant est en panne totale, si aucun trafic ne peut être écoulé sur ce composant
- ◆ **Panne partielle :** Un composant en panne partielle peut transmettre une partie du trafic.

Dans notre étude, on suppose que les pannes sont totales et statiquement indépendantes, chaque panne est réparée par un réparateur qui lui propre.

Les arrivées des pannes et la durée des réparations sont exponentielles (hypothèse Markovien).

Notons que généralement les nœuds sont plus fiables que les artères, et les artères sont plus fiables que les arcs systèmes.

## I. 8 Grandeurs de sûreté de fonctionnement :

La sûreté de fonctionnement se présente aujourd'hui comme un vecteur d'état formé par quatre composantes : fiabilité, maintenabilité, disponibilité, et sécurité.

- ✓ **La fiabilité  $R(t)$  :** Elle est mesurée par la probabilité qu'un système S remplisse sans défaillance, jusqu'à l'instant  $t$ , les fonctions pour les quelles il a été conçu et dans des conditions d'utilisation données.

$$R(t) = \text{probabilité}(S \text{ non défaillant sur } [0, t])$$

- ✓ **La disponibilité  $A(t)$**  : Elle est mesurée par la probabilité que le système S soit non défaillant à l'instant t. Dans le cas d'un système non réparable, la définition de  $A(t)$  est équivalente à celle de la fiabilité.

$$A(t) = \text{probabilité (S non défaillant à l'instant t)}$$

- ✓ **La maintenabilité  $M(t)$**  : Elle est mesurée par la probabilité de maintenir ou de rétablir en un temps t, le système S en un état de bon fonctionnement sachant qu'il était défaillant à l'instant ( $t=0$ )
- ✓ **La sécurité  $S(t)$**  : Elle est mesurée par la probabilité que le système n'ait pas eu, jusqu'à l'instant t, de défaillance catastrophique.

La disponibilité d'un système réparable en fonctionnement continu tend vers une valeur limite non nulle lorsque t tend vers l'infini, et que cette limite est la proportion de temps pendant lequel le système est en état de bon fonctionnement.

Un certain nombre de sigles désignant des moyennes temporelles sont utilisées en fiabilité :

**MTTF** : Durée moyenne de bon fonctionnement d'un système avant la première défaillance (Mean Time To Failure).

$$MTTF = \int_0^{\infty} R(t) dt \quad (\text{I. 1})$$

**MTTR** : Durée moyenne des temps de réparation (Mean Time To Repair).

$$MTTR = \int_0^{\infty} (1 - M(t)) dt \quad (\text{I. 2})$$

**MUT** : Durée moyenne de bon fonctionnement après réparation (Mean Up Time).

Le MUT est différent du MTTF car lorsque le système est remis en service après une défaillance, tous ses éléments défaillant n'ont pas été nécessairement réparés, ces deux valeurs sont très voisines.

**MDT** : Durée moyenne de défaillance (Mean Down Time) cette durée comprend la détection de la panne, la durée de réparation et la durée de remise en service.

**MTBF** : Moyenne des temps entre deux défaillances d'un système réparable (Mean Time Between Failure).

Naturellement  $MTBF=MUT+MDT$

(I. 3)

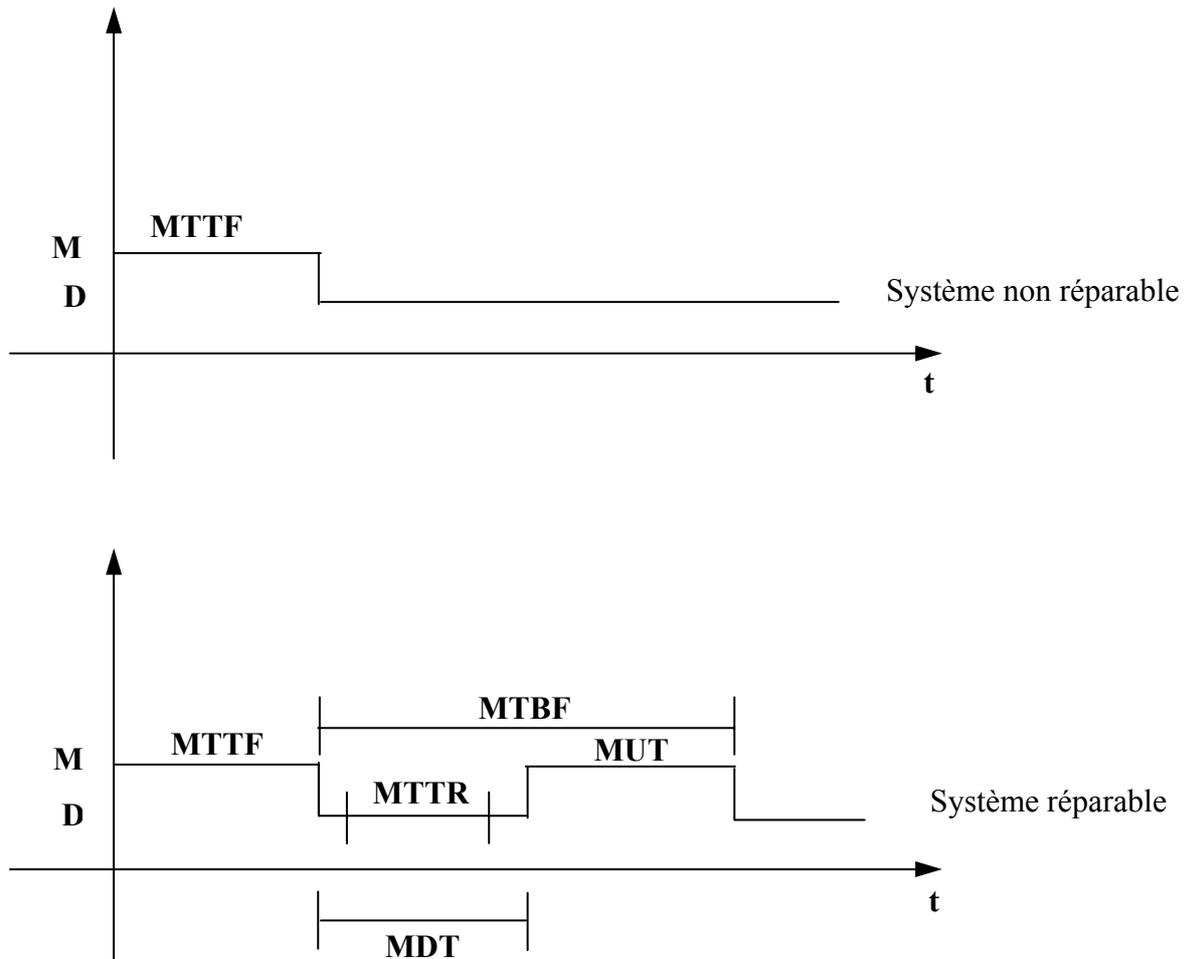


Figure : I .10 Evolution temporelle de l'état d'un système

### I. 8.1 Méthodes d'analyse de la sûreté des systèmes :

- ❖ **Evaluation stochastique** : L'évaluation stochastique ou quantitative consiste à décrire les caractéristiques du système. Deux types d'approches sont utilisés en sûreté de fonctionnement :

- ◆ La première dite (déterministe) consiste à rechercher une fonction exprimant l'état du système en fonction de celui de ces composants.
- ◆ La seconde dite (probabiliste) consiste à définir un modèle de probabilité et évaluer une probabilité d'occurrence d'un ou de plusieurs événements définis au niveau de système.

Le taux de défaillance  $\lambda(t)$  et le taux de réparation  $\mu(t)$  sont donnés par :

$$\lambda(t) = \frac{-dR(t)}{R(t)dt} \Rightarrow R(t) = \exp\left(-\int_0^t \lambda(t)dt\right).$$

$$\mu(t) = \frac{-dM(t)}{(1-M(t))dt} \Rightarrow M(t) = 1 - \exp\left(-\int_0^t \mu(t)dt\right). \quad (\text{I. 4})$$

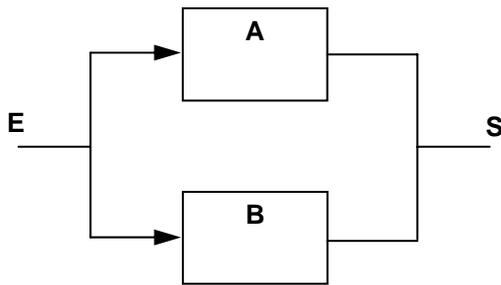
Sous l'hypothèse :  $\mu(t) = \mu = \text{constante}$ ,  $\lambda(t) = \lambda = \text{constante}$

$$R(t) = \exp(-\lambda t) \Rightarrow MTTF = \int_0^{\infty} \exp(-\lambda t) dt .$$

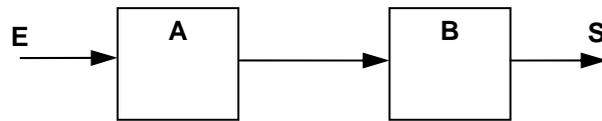
$$M(t) = 1 - \exp(-\mu t) \Rightarrow MTTR = \int_0^{\infty} \exp(-\mu t) dt . \quad (\text{I.5})$$

❖ **Les méthodes d'analyse :** Pour modéliser le système par un modèle mathématique, il existe diverses représentations logique, on cite les plus importantes :

✓ **Diagramme de fiabilité :** C'est la représentation la plus naturelle de la logique de fonctionnement d'un système, car elle est souvent proche de schéma fonctionnel du système .Dans cette représentation, les blocs représentant des éléments (matériels ou événements) ou des fonctions, dont la défaillance entraîne la défaillance du système sont placés en série, ceux dont la défaillance ne provoque la défaillance du système qu'en combinaison avec d'autres blocs sont disposés en parallèle sur ces derniers.



**Figure I.11** Diagramme  
Parallèle



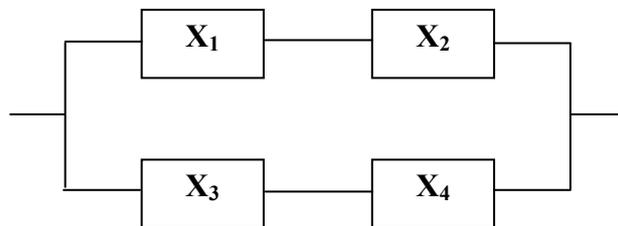
**Figure I.12** Diagramme  
série

- ✓ **Arbre de défaillance** : C'est l'une des représentations les plus utilisées de la logique d'un système, connue aussi sous le nom d'arbre des défauts, d'arbre des causes ou d'arbre des fautes. Son principe est de partir d'un événement indésirable unique et bien défini. Dans le cas de l'étude de la disponibilité et de la fiabilité d'un système cet événement indésirable est le non fonctionnement du système.

Dans le cas de l'étude d'une sûreté c'est un événement dont les conséquences sont graves. L'AdD représente graphiquement les combinaisons d'événement qui conduisent à la réalisation de cet événement indésirable. Cet arbre est défini comme un graphe orienté, formé de niveaux successifs tels que chaque événement intermédiaire est généré par des événements d'ordre inférieur agissant à travers des portes logiques. Ces événements de base peuvent être des pannes, des erreurs humaines des conditions externes ...etc.

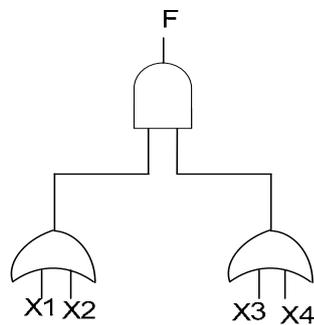
#### Exemple :

Considérons le système représenté par le diagramme bloc de fiabilité (DBF) suivant



**Figure I.13** Exemple de DBF

Le système est en panne si les deux files sont en panne. L'arbre de défaillance de ce système sera :



**Figure I.14** Arbre de défaillance (AdD) associé.

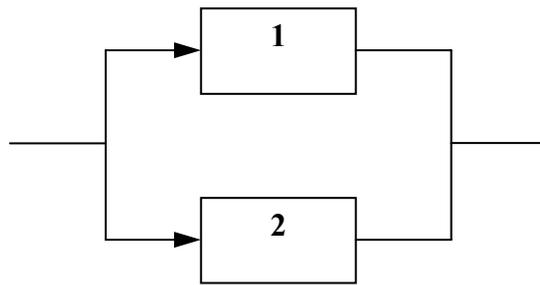
$$F=(X_1+X_2)(X_3+X_4) = X_1 X_3 + X_1 X_4 + X_2 X_4 + X_2 X_3 \quad (\text{I.6})$$

✓ **Diagramme des états** : Pour tenir compte des dépendances entre les différents éléments d'un système, on construira un graphe dont les sommets correspondront aux différents états du système (si chaque élément à deux états : marche et panne et si le système à  $n$  éléments, le nombre maximum des états est  $2^n$ ) et dont les arcs correspondront aux transitions entre états. Sur ce graphe, chaque arc  $(i, j)$  est évalué par le taux de transition de l'état  $i$  à l'état  $j$  (taux de défaillance instantané et taux de réparation instantané).

**Le taux de défaillance du système ( $\lambda$ )** : c'est la probabilité pour que le système tombe en panne à l'instant  $t$  sachant qu'il n'a pas eu de défaillance pendant l'intervalle  $[0, t]$ .

**Le taux de réparation instantané du système ( $\mu$ )** : c'est la probabilité pour que le système soit réparé à l'instant  $t$  sachant qu'il a été en panne pendant l'intervalle  $[0, t]$ .

**Exemple** : on considère un système formé de deux éléments identiques en parallèle :



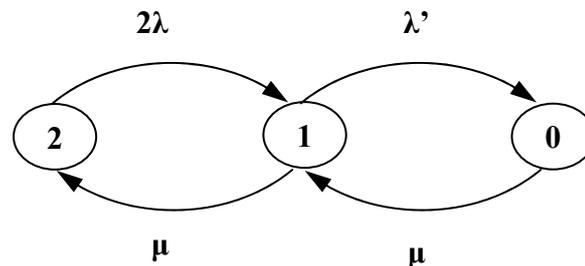
**Figure I.15** Système à deux éléments

Lorsque les deux éléments fonctionnent, ils ont chaque un taux de défaillance ( $\lambda$ ).

Lorsque l'un des deux éléments tombe en panne l'autre admet un taux de défaillance  $\lambda' > \lambda$ .

En notant (2) l'état du système où les deux éléments fonctionnent, (1) l'état du système où un seul élément est en panne et (0) l'état du système où les deux éléments sont en panne.

Nous aurons alors le graphe des états suivant :



**Figure I.16** Exemple de graphe des états

Cette représentation permet de tenir compte de la dépendance entre les deux éléments.

Si la probabilité de passer de l'état  $i$  à  $j$  entre l'instant  $t$  et  $t + \Delta t$  est  $\lambda_{ij} \Delta t$  alors  $\lambda_{ij}$  est le taux de transition entre les états  $i$  et  $j$ .

Lorsque les taux de transition entre les états sont constants, le système est dit MARKOVIEN, le graphe des états sera alors appelé Graphe de MARKOV. Pratiquement cette représentation est beaucoup plus lourde que les précédentes. Elle ne sera donc utilisée que pour les sous-systèmes du système général, à l'intérieur desquels il existe de fortes liaisons entre les éléments

## I. 9 La fiabilité des réseaux :

La fiabilité d'un réseau est exprimée par la capacité de ce dernier à assurer dans des bonnes conditions le transport et l'échange des informations (voies, données, images, fixe ou animées etc.), et cela malgré l'apparition des défaillances qui peuvent affecter les nœuds ou les liaisons.

Les défaillances dans un réseau se manifestent de diverses manières, elles peuvent être dues soit à des fautes logiques dans les logiciels, soit à des considérations structurelles.

- **La défaillance logicielle :** résulte du mauvais fonctionnement des algorithmes comme :

Le reroutage qui ne peut pas détecter une route existante.

Le contrôle de flux qui provoque une congestion dans le réseau.

- **La défaillance structurelle :** résulte, soit d'action malveillante, soit d'erreurs naturelles (faute de programmation ou de maintenance). Dans ce cas, l'évaluation de la fiabilité d'un réseau est généralement effectuée dans un contexte d'apparition aléatoire des défaillances.

La commission électronique internationale a donnée la définition suivante pour la fiabilité : « aptitude d'une entité à accomplir une fonction requise, dans des conditions données pendant une durée donnée ».

### I. 9.1 Mesure choisie de fiabilité du réseau :

On désire connaître la proportion du temps pendant laquelle un réseau n'a pas été capable d'écouler la demande nominale de trafic. Il est également intéressant de connaître quel est le volume de trafic qui a été perdu pendant cette indisponibilité.

Dans ce cas, le temps n'intervient pas au sens de l'évolution du réseau : on se place soit à un instant donné, soit sur un intervalle de temps sur lequel les probabilités de fonctionnement des composants sont constantes (c'est-à-dire en régime stationnaire).

Les mesures de fiabilité sont alors :

- **Le trafic perdu moyen :** l'espérance mathématique du trafic perdu pour chaque état du réseau.

- **La disponibilité** : la probabilité que le réseau fonctionne c'est-à-dire soit en état de fonctionnement à l'instant  $t$ . en régime stationnaire, on dit aussi la probabilité de fonctionnement par unité de temps.

A fin de définir précisément ces deux mesures, il faut d'abord définir l'état de défaillance et l'état de fonctionnements pour le réseau pour cela le réseau peut être représenté par un graphe  $G = (N, E)$   $N$  étant l'ensemble des sommets qui représente les nœuds et  $E$  l'ensemble des arcs représente les arcs systèmes avec une certaine capacité donnée.

**I. 9. 2 Etat binaire d'un composant** : Les composants du réseau sont dans un état binaire soit état de défaillance, soit dans l'état de fonctionnement.

Ils tombent en panne indépendamment et au hasard, et sont réparés indépendamment selon une loi exponentielle (hypothèse Markovienne).

Soit  $\lambda_i$  le taux de défaillance et  $\mu_i$  le taux de réparation d'un composant  $i$ , la probabilité de défaillance du composant  $i$  est donnée par :

$$q_i = \frac{\lambda_i}{\lambda_i + \mu_i} \left[ 1 - e^{-(\lambda_i + \mu_i)t} \right] \quad (\text{I. 7})$$

et sa probabilité de fonctionnement :  $p_i = 1 - q_i$

A l'état stationnaire ( $t$  tend vers l'infini) on obtient :

$$p_i = \frac{\mu_i}{\lambda_i + \mu_i} \quad \text{Et} \quad q_i = \frac{\lambda_i}{\lambda_i + \mu_i} \quad (\text{I.8})$$

**I. 9. 3 Etat binaire d'un réseau** : un état du réseau est fonction des états de ses composants, de sa topologie et de sa stratégie de reroutage. On peut associer à l'état du réseau  $e_i$  le taux de trafic rerouté  $\partial(e_i)$  exprimé par :

$$\partial(e_i) = \frac{\text{trafic}_{\text{demandé}} - \text{trafic}_{\text{perdu}}(e_i)}{\text{trafic}_{\text{demandé}}} \quad (\text{I.9})$$

Avec le trafic \_ demandé est la somme de toutes les demandes entre deux nœuds, et le trafic\_perdu( $e_i$ ) est la somme des trafics perdus (qui n'ont pas été rerouté) entre deux nœuds à l'état  $e_i$ . Ce taux est connu après le reroutage.

Donc pour un état du réseau  $e_i$ , si  $\partial(e_i)$  après le reroutage est supérieur à un taux donné  $\tau$  ( $\tau$  est appelé le coefficient de disponibilité), on parle d'état de fonctionnement, sinon, on parle d'état de défaillance. Ainsi, l'ensemble E des états du réseau peut être partitionné en deux ensembles : E1 l'ensemble des états de fonctionnement, et E2 celui des états de défaillance.

Donc le trafic perdu moyen et la disponibilité sont définis comme suit

$$\text{Trafic\_perdu} = \sum_{e_i \in E} p(e_i) \text{trafic\_perdu}(e_i)$$

$$\text{Disponibilité} = \sum_{\partial(e_i) \geq \tau} p(e_i) \quad (\text{I.10})$$

# Chapitre II :

*Les Méthodes d'évaluation  
de la fiabilité des réseaux*

## II. 1 Introduction :

Pour évaluer les mesures de fiabilité deux approches ont été utilisées :

- Le calcul du taux moyen de trafic perdu qui se fait par des processus de reroutage.
- le calcul probabiliste qui est effectué d'une manière analytique, pour cela plusieurs méthodes de calcul existent parmi ces dernières nous citerons : la méthode fondée sur l'agrégation d'états des chaînes de Markov, méthode d'énumération des états de réseau, méthode des coupes et des chemins et méthode de simplification de graphe.

## II. 2 Les méthodes de calcul de la fiabilité :

### II. 2.1 Méthode fondée sur les chaînes de Markov :

Elle s'appuie sur la théorie des processus stochastiques. L'évolution de l'état du réseau est modélisée par une chaîne de Markov dont les propriétés sont étudiées en régime stationnaire, ceci permet de calculer les indices comme la fiabilité et la disponibilité, et aussi, de prendre en compte les réparations.

On suppose que le matériel ne vieillit pas (c'est-à-dire, les taux de défaillance et de réparation sont constants pour chaque composant). A un instant donné, l'état  $x$  est observé, la probabilité pour qu'il soit dans l'état  $y$  à l'instant suivant ne dépend que de  $x$  et pas de la durée depuis laquelle il est dans cet état, si non, on aura un système semi – Markovien.

Cependant, dans un réseau de grande taille, il y a pratiquement trop d'états. Par conséquent il est important d'agréger les états du réseau.

#### II. 2.1.1 Principe de base :

✓ **Chaîne de Markov** : Un processus de Markov est un processus stochastique  $X(t)$  tel que, étant donné trois instants  $t, u, s$ , ou  $t > u > s$ , la valeur de  $X(t)$  lorsque  $X(u)$  est connue ne dépend que de  $X(u)$  et pas de  $X(s)$ . Autrement dit, les états futurs d'un processus de Markov ne dépendent que de l'état présent et non de la trajectoire qui permet d'atteindre cet état :

$$P[X(t) = E_i / X(u), X(s)] = P[X(t) = E_i / X(u)] \quad (\text{II.1})$$

Si le nombre d'états est fini ou dénombrable, un processus de Markov est appelé une chaîne de Markov. Lorsque le temps est discret et l'espace des états est fini, on note E l'ensemble des états.  $E = \{e_i, i = 1, 2, \dots\}$  les changements d'états se produisent aux instants entiers notés  $t_1, t_2, \dots, t_k$ .

$P_i(t_k)$  la probabilité qu'à la date  $t_k$  le système soit dans l'état  $e_i$ . La probabilité de la transition de l'état  $e_i$  à l'état  $e_j$  ne dépend donc que de ces deux états, cette probabilité est notée :

$$P_{ij} = P(X(t_{k+1}) = e_j / X(t_k) = e_i) \tag{II.2}$$

✓ **Processus de naissance et de mort** : Un processus de naissance et de mort est une chaîne de Markov à temps continu pour laquelle à partir d'un état  $n$ , on peut seulement atteindre les états  $n+1$  et  $n-1$ .

Soit  $\lambda_n$  et  $\mu_n$  les taux de naissance et de mort à partir de l'état  $n$ , la chaîne de Markov peut se présenter comme ci-dessous :

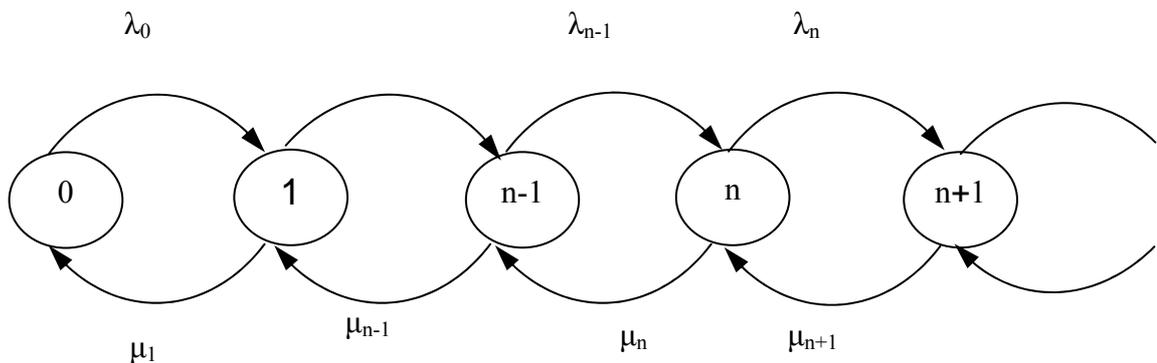


Figure II. 1 : un processus de naissance et de mort

D'après la définition ci-dessus, on peut écrire l'équation de Markov pour  $n > 0$  :

$$P(n) = \lambda_{n-1}P(n-1) + \mu_{n+1}P(n+1) + (1 - \lambda_n - \mu_n)P(n)$$

**Alors :**  $(\lambda_n + \mu_n)P(n) = \lambda_{n-1}P(n-1) + \mu_{n+1}P(n+1)$

$$\text{Et } \lambda_0 P(0) = \mu_1 P(1) \quad (\text{II.3})$$

Cette chaîne est ergodique si :

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\lambda_n}{\mu_n} < 1$$

Si cette condition est vérifiée, on obtient :

$$P(1) = \frac{\lambda_0}{\mu_1} P(0)$$

$$P(n) = \frac{\lambda_0 \lambda_1 \dots \lambda_{n-1}}{\mu_1 \mu_2 \dots \mu_n} P(0) \quad n \geq 2 \quad (\text{II.4})$$

Après normalisation, nous obtenons la solution générale :

$$P(0) = \left[ 1 + \sum_{n=0}^{\infty} \prod_{i=0}^{n-1} \frac{\lambda_i}{\mu_{i+1}} \right]^{-1}$$

$$P(n) = \frac{\lambda_0 \lambda_1 \dots \lambda_{n-1}}{\mu_0 \mu_1 \dots \mu_n} \left[ 1 + \sum_{n=0}^{\infty} \prod_{i=0}^{n-1} \frac{\lambda_i}{\mu_{i+1}} \right]^{-1} \quad (\text{II.5})$$

- ✓ **Les files d'attente:** Des clients arrivent à un certain endroit et réclament un certain service, si un poste de service est libre, le client qui arrive se dirige immédiatement vers ce poste où il est servi, si non il prend sa place dans la file d'attente dans laquelle les clients se rangent suivant leur ordre d'arrivée.

Un système d'attente comprend donc un espace de service avec une ou plusieurs stations de service et un espace d'attente dans lequel se forme une éventuelle file d'attente.

On s'intéresse à deux cas particuliers de file d'attente :

**Une file d'attente  $M/M/1$  :** Est une file d'attente avec un processus de Markov en entrée et en sortie, un seul serveur, une discipline de service du type *FIFO* (First In, First Out). Une capacité de file infinie et un nombre infini qui peuvent entrer dans cette file.

**Une file d'attente  $M/M/\infty$  :** Est une file d'attente similaire avec un nombre de serveur toujours supérieur au nombre de clients de telle sorte qu'aucun client n'attend, (M désigne markovien).

Si l'état de système est défini comme étant le nombre de clients, ces files sont en fait des processus de naissance et de mort.

Nous pouvons alors calculer la probabilité du nombre de clients dans la file en régime stationnaire ce qui donne :

Pour la file d'attente  $M/M/1$  :

$$P(0) = \left[ 1 + \sum_{n=0}^{\infty} \prod_{i=0}^{n-1} \frac{\lambda_i}{\mu_{i+1}} \right]^{-1}$$

$$P(n) = P(0) \prod_{i=0}^{n-1} \frac{\lambda_i}{\mu_{i+1}} \quad (\text{II.6})$$

Pour la file d'attente  $M/M/\infty$  en supposant,  $\lambda_i = \lambda$ ,  $\mu_i = i\mu$  pour tout  $i$  on obtient :

$$P(0) = \left[ 1 + \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\lambda^n}{n! \mu^n} \right]^{-1}$$

$$P(n) = P(0) \frac{\lambda^n}{n! \mu^n} \quad (\text{II.7})$$

## II. 2.1.2 Algorithme chaîne –Markov :

Cet algorithme contient les quatre étapes suivantes :

1. Définition d'un modèle Markovien simplificateur de réseau. Ce modèle devra avoir un nombre d'états faible.
2. Etude de la chaîne de Markov associée.
3. Enumération des états du réseau.
4. Correspondance des deux ensembles d'états et exploitation des résultats.

Nous expliquons ci-dessous les quatre étapes de cette méthode.

### Etape1 :

La définition de ce modèle se fait selon deux aspects :

- La structure de réseau.
- La stratégie de reroutage.

En ce qui concerne la structure du réseau, il est modélisé par un graphe  $G = (N, E)$ . Les nœuds sont supposés parfaits, et les arcs systèmes peuvent tomber en panne avec un taux de défaillance très faible. Lors d'une panne d'arc système, aucun trafic ne s'écoule sur celui-ci, alors une action de reroutage est effectuée en un temps supposé négligeable.

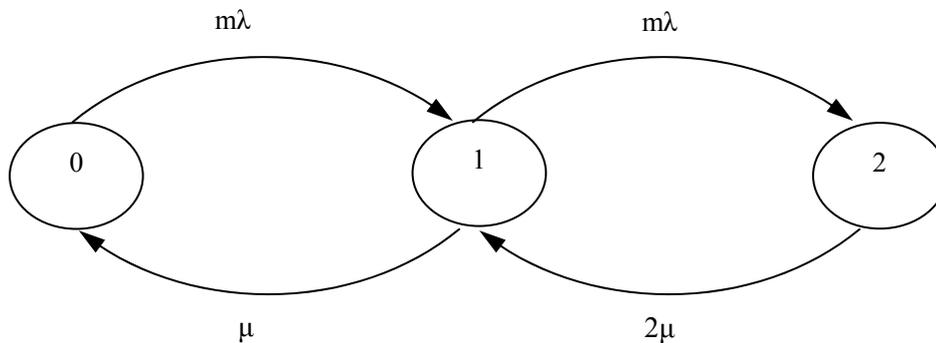
On suppose, que les arrivées des pannes d'arcs système suivent un processus de poisson de taux  $m\lambda$ , et qu'une équipe de maintenance lance un processus de réparation supposé suivre aussi un processus de poisson de taux  $\mu$ .

Après la réparation, le réseau revient à l'état où cet arc fonctionne, c'est-à-dire les demandes perturbées reprennent les routes antérieures au reroutage.

Par contre la politique de reroutage utilisée est partielle, c'est-à-dire seul l'ensemble des demandes qui passaient sur les arcs systèmes en panne est rerouté. De plus, en cas de plusieurs arcs en panne on les reroute une par une dans l'ordre de leur arrivées.

Sous les hypothèses ci-dessus, le nombre d'arcs systèmes en panne forme une file d'attente  $M/M/\infty$  s'il y a assez d'équipes de réparation, ou bien  $M/M/1$  s'il n'y en a qu'une, ce sont des chaînes de Markov, c'est pour cela qu'en parle de modèle Markovien.

Dans notre cas, puisque  $\frac{m\lambda}{\mu}$  est très petit, on peut considérer trois états seulement dans cette file :



**Figure II.2** File d'attente avec trois états

**Etape 2 :** Il s'agit de calculer la probabilité d'un état pour cette file d'attente :

$$P(0) = \left[ 1 + \frac{\lambda_0}{\mu_1} + \frac{\lambda_0 \lambda_1}{\mu_1 \mu_2} \right]^{-1}$$

$$P(1) = \frac{\lambda_0}{\mu_1} \left[ 1 + \frac{\lambda_0}{\mu_1} + \frac{\lambda_0 \lambda_1}{\mu_1 \mu_2} \right]^{-1}$$

$$P(2) = \frac{\lambda_0 \lambda_1}{\mu_1 \mu_2} \left[ 1 + \frac{\lambda_0}{\mu_1} + \frac{\lambda_0 \lambda_1}{\mu_1 \mu_2} \right]^{-1} \quad \text{(II.8)}$$

Ici,  $\lambda_0 = m\lambda$ ,  $\lambda_1 = m\lambda$ ,  $\mu_1 = \mu$ ,  $\mu_2 = 2\mu$

Alors :

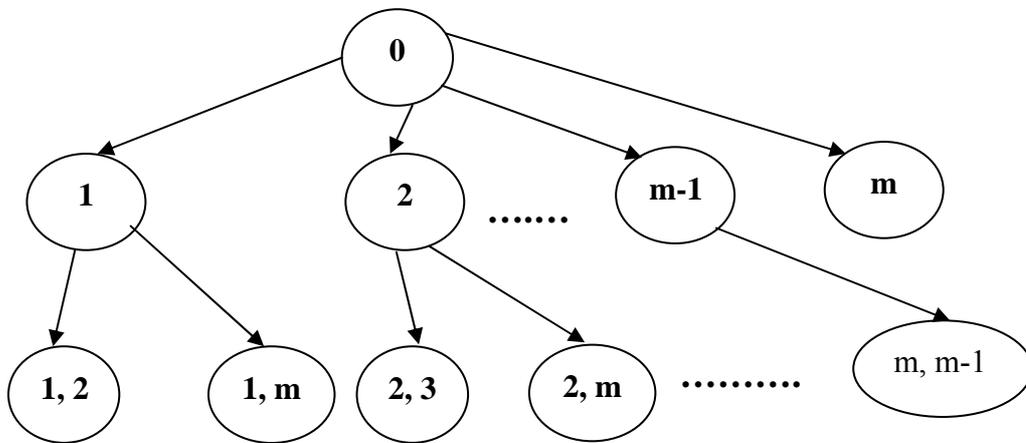
$$P(0) = \left[ 1 + \frac{m\lambda}{\mu} + \frac{m^2 \lambda^2}{2\mu^2} \right]^{-1}$$

$$P(1) = \frac{m \lambda}{\mu} \left[ 1 + \frac{m \lambda}{\mu} + \frac{m^2 \lambda^2}{2 \mu^2} \right]^{-1}$$

$$P(2) = \frac{m^2 \lambda^2}{2 \mu^2} \left[ 1 + \frac{m \lambda}{\mu} + \frac{m^2 \lambda^2}{2 \mu^2} \right]^{-1} \tag{II.9}$$

**Etape 3 :** Il s'agit de faire correspondre les états de la file d'attente aux états du réseau. Dans cette file, l'état 0 signifie qu'il n'y a aucune panne dans le réseau, cet état correspond exactement à un état de réseau où aucune panne se produit, l'état 1 signifie qu'il n'y a qu'une panne dans le réseau, cet état de la file d'attente contient m états de réseau : chacun d'entre eux correspond à un arc système en panne ; de la même façon, l'état 2 signifie qu'il n'y a que deux arcs systèmes en panne, et il correspond à  $C_m^2$  états du réseau.

Ceci nous permet de présenter le schéma des états du réseau par l'arborescence suivante :



**Figure II.3 :** Enumération des états du réseau

Le chiffre indiqué dans l'arborescence correspond au numéro de l'arc système.

**Etape 4 :** Pour chaque état de réseau, on calcule le taux de trafic rerouté  $\partial(ei)$  voir l'équation (I.12), d'où la disponibilité est :

$$\text{Disponibilité} = P(0) + \sum_{\delta(ei) \geq \tau} \frac{P(1)}{m} + \sum_{\delta(ej) \geq \tau} \frac{P(2)}{C_m^2} \quad (\text{II.10})$$

Avec :  $\tau$  coefficient de disponibilité,

$m$  : état du réseau avec un seul arc en panne,

$$C_m^2 = \frac{m(m-1)}{2} \text{ Nombres des états avec deux arcs en panne,}$$

$\frac{P(1)}{m}$  et  $\frac{P(2)}{C_m^2}$  Correspondent respectivement aux probabilités des états avec une panne et

ceux avec deux pannes.

## II. 2.2 Méthode d'énumération des états :

D'après la définition des mesures de fiabilité, une façon simple de les calculer est d'énumérer tous les états possibles du réseau et d'évaluer les mesures pour chaque état, suivant l'hypothèse d'indépendance stochastique du comportement des composants du réseau (panne, réparation). Ceci s'appelle la méthode d'énumération complète, mais la grande taille de réseau rendrait l'énumération complète irréalisable, une alternative est l'énumération partielle basée sur l'énumération des états les plus probables du réseau.

Exemple d'application :

On s'intéresse dans cet exemple à la probabilité de transmettre un message entre un nœud source  $s$  et un nœud destination  $t$ . Les liaisons sont supposées avoir la même probabilité de bon fonctionnement  $p$  (fiabilité polynomiale).

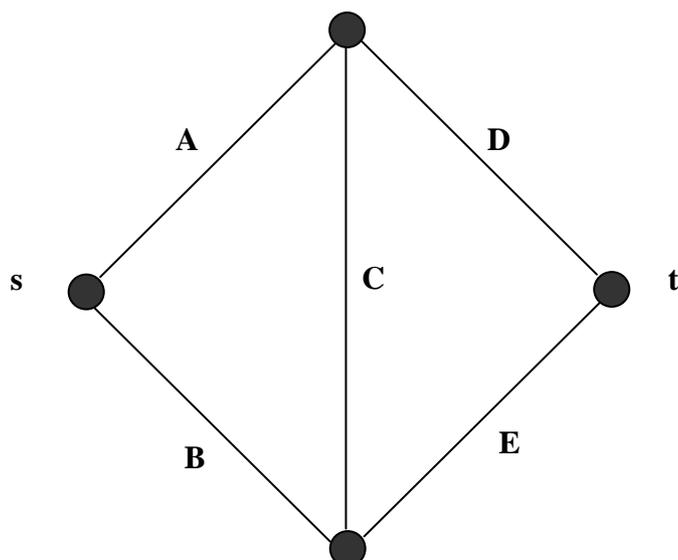


Figure II. 4 : Exemple d'application

### II. 2.2.1 Enumération totale des états :

La méthode la plus directe pour évaluer la fiabilité  $R(t)$  consiste à énumérer l'ensemble des états de succès  $S_i$  pour lequel il existe au moins un chemin de communication entre les nœuds  $s$  et  $t$  considérés. Il suffit ensuite d'évaluer la probabilité d'être dans l'état  $S_i$  et de sommer les différentes probabilités obtenues.

L'énumération des états de succès du réseau de la figure (II.4) donne 16 états parmi 32 états possibles ( $2^5$ ). Le tableau suivant regroupe des états de succès  $S_i$  (1 représente le bon fonctionnement et 0 la défaillance d'un élément) :

ETATS	A	B	C	D	E
1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	0
3	1	1	1	0	1
4	1	1	0	1	1
5	1	1	0	1	0
6	1	1	0	0	1
7	1	0	1	1	1
8	1	0	1	1	0
9	1	0	1	0	1
10	1	0	0	1	1
11	1	0	0	1	0
12	0	1	1	1	1
13	0	1	1	1	0
14	0	1	1	0	1
15	0	1	0	1	1
16	0	1	0	0	1

**Tab II.1** : Enumération totale des états de succès  $S_i$

Ainsi  $R(t) = \sum_{S_i \in S} P(S_i)$  (somme des probabilités des états de succès  $S_i$  du tableau **(II.1)**)

$$R(t) = p_A p_B p_C p_D p_E + p_A p_B p_C p_D q_E + p_A p_B p_C q_D p_E + p_A p_B q_C p_D p_E + p_A p_B q_C p_D q_E + p_A p_B q_C q_D p_E + p_A q_B p_C p_D p_E + p_A q_B p_C p_D q_E + p_A q_B p_C q_D p_E + p_A q_B q_C p_D p_E + p_A q_B q_C p_D q_E + q_A p_B p_C p_D p_E + q_A p_B p_C p_D q_E + q_A p_B p_C q_D p_E + q_A p_B q_C p_D p_E + q_A p_B q_C q_D p_E$$

Sachant que  $p_i = p \forall i$  (la fiabilité polynomiale) et  $q = 1-p$ , on a :

$$R(t) = 2p^2(1-p)^3 + 8p^3(1-p)^2 + 5p^4(1-p) + p^5 \quad (\text{II.11})$$

La difficulté due à l'énumération totale des états est de trouver les états de succès du tableau (II.1) ; à priori, il faut énumérer au préalable l'ensemble des états  $2^M$  du système, et vérifier ensuite qu'il s'agit d'un état de succès. La solution à cette explosion combinatoire, surtout pour les réseaux de grande taille est, soit d'accélérer la recherche des états de succès par exemple à l'aide de la méthode des coupes et des chemins, soit d'approximer le résultat par une énumération partielle des états de succès. Nous allons étudier dans un premier temps cette deuxième solution.

### II. 2.2.2 Enumération partielle des états :

Avec cette méthode, seuls les  $m$  états les plus probables sont pris en compte : Li et Silvester proposent pour cela un algorithme d'ordonnement des états. Dans le cas simplifié de la fiabilité polynomiale ( $p_i = p \forall i$ ) correspondant à la réalité des réseaux de télécommunications, les états les plus probables sont d'abord les états de pannes simples, ensuite les états de pannes doubles, etc., avec  $p = 0.9$ .

- **Cas des pannes simples :** Le nombre d'états à énumérer est  $m = M+1 = 6$  (cinq états de panne simple plus l'état sans panne), puisque il y a 5 arcs dans cet exemple ; ainsi :

$$R(t) = p^5 + 5p^4q = 0.91854. \quad (\text{II.12})$$

- **Cas des pannes doubles (2 pannes simultanées) :** Le nombre d'états à énumérer est  $m = 14$  états, les états de pannes simples plus les états de pannes doubles, plus l'état sans pannes, ainsi :

$$R(t) = p^5 + 5p^4q + 8p^3q^2 = 0.97686. \quad (\text{II.13})$$

Il n'est pas nécessaire d'aller plus loin avec les états de pannes triples et plus, puisque le résultat exact obtenu par le calcul de (II.11) est  $R(t) = 0.97848$ .

Le nombre d'états  $m$  considéré dépend de la taille du réseau, ainsi que de la valeur de  $p$ . Le tableau suivant donne une idée du choix de  $m$ .

$M$  représentant le nombre d'arcs de réseau,  $L$  le nombre de pannes simultanées,  $m$  le nombre d'états énumérés, on a :

M	L	m	p	R(t)	Espace total
5	0	1	0.90	0.5905	$2^5=32$ états
			0.95	0.7738	
			0.99	0.9703	
	1	6	0.90	0.9185	
			0.95	0.9774	
			0.99	0.9708	
	2	14	0.90	0.97686	
			0.95	0.99455	
			0.99	0.99980	

## II. 2.3 Méthode des coupes et des chemins :

Les techniques des coupes et des chemins utilisées dans le calcul de fiabilité se déroulent en deux phases critiques en temps de calcul :

Recherche de l'ensemble des chemins ou coupes minimales.

Développement des termes de l'expression probabiliste obtenue.

**Etape 1 :**

La première étape passe par l'identification des  $j$  coupes ou des  $k$  chemins. Pour le réseau de la figure on trouve :

Pour les chemins minimaux : AD, BE, BCD, ACE.

Pour les coupes minimales : AB, DE, ACE, BCD.

**Etape2 :**

Elle consiste à développer les  $2^j - 1$  et les  $2^k - 1$  termes de l'expression probabiliste obtenue. Par exemple, selon le principe d'inclusion exclusion (IE) qui est basé sur le théorème de Poincaré :

$$P \left\{ \bigcup_{i=1}^k K_i \right\} = \sum_{i=1}^{k-1} P(K_i) - \sum_{i=1}^{k-1} \sum_{j=i+1}^k P(K_i \cap K_j) + \dots + (-1)^{k-1} P\left(\bigcap_{i=1}^k K_i\right). \quad (\text{II.14})$$

Telle que la fiabilité du réseau est exprimée par la probabilité de l'union des ensembles minimaux (chemins).

Un chemin est une chaîne de composants (nœuds ou liaison) reliant le nœud source S et t est obtenu lorsque tous les composants de la chaîne sont en état de fonctionnement. La fiabilité du réseau est la probabilité de trouver au moins un chemin.

Dans un graphe G possédant n chemins  $P_1, P_2, \dots, P_n$ , la fiabilité est donnée par l'expression :

$$R(t) = S_1 - S_2 + S_3 - \dots + (-1)^{n-1} S_n$$

Dans laquelle le terme  $S_1$  représente la somme des probabilités des chemins prisent 1 à 1,  $S_2$  représente la somme des probabilités des chemins prisent 2 à 2 jusqu'à  $S_n$  qui représente la somme des probabilités des chemins prisent n à n avec  $n=4$  dans notre exemple

Donc :

$$R(t) = p(AD + BE + BCD + ACE) = 1 - [p(\bar{A}\bar{B} + \bar{D}\bar{E} + \bar{A}\bar{C}\bar{E} + \bar{B}\bar{C}\bar{D})] \quad (\text{II.15})$$

Où  $A$  signifie que la liaison  $A$  est opérationnelle et  $\bar{A}$  qu'elle est défectueuse (idem pour  $B$ ,  $C$ ,  $D$  et  $E$ ).

Le développement de Tab II.14 selon le principe d'inclusion- Exclusion donne :

$$R(t) = \{ 1 - [P(\bar{A}\bar{B}) + P(\bar{D}\bar{E}) + P(\bar{A}\bar{C}\bar{E}) + P(\bar{B}\bar{C}\bar{D})] \\ - [P(\bar{A}\bar{B}\bar{D}\bar{E}) + P(\bar{A}\bar{B}\bar{C}\bar{E}) + P(\bar{A}\bar{B}\bar{C}\bar{D}) + P(\bar{A}\bar{C}\bar{D}\bar{E}) + P(\bar{B}\bar{C}\bar{D}\bar{E}) + P(\bar{A}\bar{B}\bar{C}\bar{D}\bar{E})] \\ + [4P(\bar{A}\bar{B}\bar{C}\bar{D}\bar{E})] - [P(\bar{A}\bar{B}\bar{C}\bar{D}\bar{E})] \}$$

Dans le cas de la fiabilité polynomiale avec  $p=0.9$  et  $q=1-p$ , on trouve :

$$R(t) = 1 - \{ [2q^2 + 2q^3] - [5q^4 + q^5] + 4q^5 - q^5 \} \\ = 1 - \{ [0.002] - [0.00051] + [0.00004] - [0.00001] \} = 0.97848 \quad (\text{II.16})$$

Dans le cas des réseaux de grande taille, les deux étapes exigent des temps de calcul important.

## II. 2.4 Méthode de simplification de graphe :

Soit un graphe  $G = (V, E)$  et son sous-graphe  $H = (W, F)$ . On définit un sous-ensemble  $X$  de  $W$  contenant tous les nœuds ayant un voisin dans  $(V, W)$  et appelés nœuds d'attachement ou de liaison. On définit ensuite la transformation qui remplace le sous-graphe  $H = (W, F)$  par un sous graphe  $H' = (W', F')$  ayant les mêmes nœuds d'attachement ou de liaison.

Les réductions sont des transformations qui, tout en préservant la fiabilité de réseau, permettent d'aboutir à un graphe plus simple en diminuant, soit le nombre de nœuds, soit le nombre d'artères/arcs, soit les deux.

Les algorithmes de simplification de graphe appliquent de manière récursive des opérations de réduction jusqu'à l'obtention d'un graphe ayant deux nœuds et une artère.

Dans le cas d'un réseau à nœuds parfaitement fiables, les réductions de base utilisées pour résoudre le problème sont : la réduction parallèle, la réduction série et la factorisation d'arrêt.

Les figures suivantes illustrent les méthodes élémentaires de simplification de graphe avec  $P_i$  désignant la probabilité de bon fonctionnement du composant  $i$  «artère».

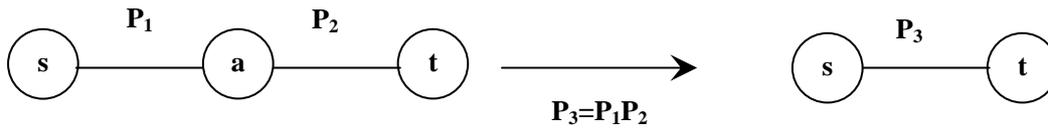


Figure : Réduction série

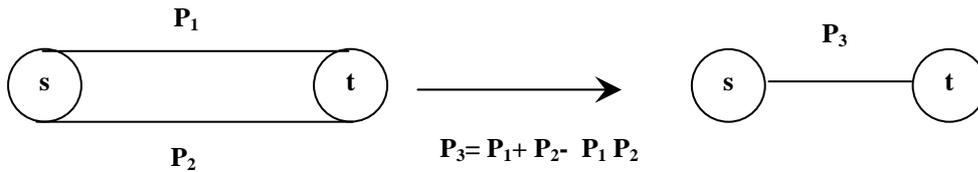
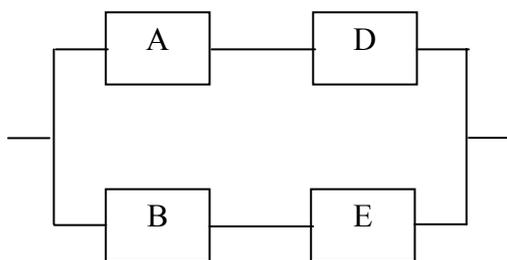
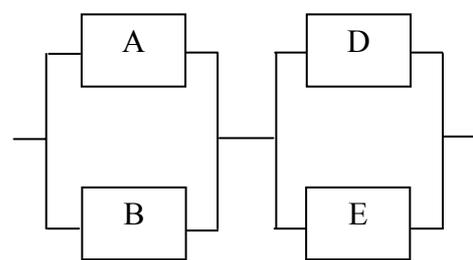


Figure II .5 : Réduction parallèle

La réduction parallèle est appliquée à des artères multiples entre deux nœuds. La réduction série est appliquée à des nœuds de degré 2, la factorisation d'artères est appliquée, en dernier recours, lorsque les autres méthodes de réduction sont inopérantes, elle est basée sur le partitionnement de l'espace de probabilité en deux ensembles correspondant au succès et à la défaillance d'une artère particulière, par exemple en prend l'artère c de la figure II.4



Fiabilité R1



Fiabilité R2

$$R = (1 - p)R_1 + pR_2. \quad (\text{II.17})$$

Système série :

$$R = \prod R_i$$

Système parallèle :

$$R = 1 - \prod (1 - R_i)$$

Comme :  $R_A=R_B=R_C=R_D=P$

$$R_1 = 1 - (1 - R_A R_D)(1 - R_B R_E) = 1 - (1 - p^2)(1 - p^2) = 0,9639.$$

$$R_2 = [1 - (1 - R_A)(1 - R_B)][1 - (1 - R_D)(1 - R_E)] = [2p - p^2]^2 = 0,9801. \quad (\text{II.18})$$

Donc :

$$\begin{aligned} R &= 0,9639 \times 0,1 + 0,9801 \times 0,9 \\ &= 0,09639 + 0,88209 \\ &= 0,97848. \end{aligned}$$

Donc cette valeur est la même avec celle qu'on a trouvé avec l'énumération totale des états d'où l'utilité de la méthode de factorisation d'artère à cause de sa simplicité.

# Chapitre III :

## *Le Reroutage*

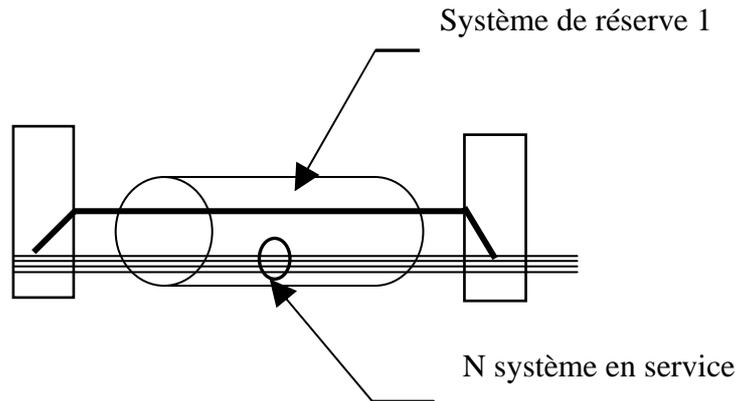
### III.1 Introduction :

Le reroutage consiste à rechercher un chemin sur le réseau logique disposant d'une capacité pour acheminer le trafic perturbé en cas de panne. Afin de faciliter la mise en œuvre du module de reroutage nous nous limitons au premier des plus courts chemins existant dans le réseau. La recherche de ces derniers est effectuée au sens du nombre d'arc ou de leur longueur.

### III .2 Sécurisation et reroutage :

Dans les réseaux de télécommunication, la sécurisation (protection) a pour but de minimiser les effets de perturbation qui affectent le réseau par le rétablissement total ou partiel de la capacité de transmission. Il existe plusieurs types de sécurisation : multiroutage des demandes, rétablissement par commutation N+1, rétablissement par utilisation du réseau de réserve (méthode de reroutage).

- ✓ **Le multiroutage :** la sécurisation par multiroutage consiste à programmer pour chaque flux de trafic à transmettre une route composée de chemins indépendants, c'est-à-dire plusieurs chemins pour rerouter le trafic perturbé.
- ✓ **Le reroutage :** quand une panne se produit, une procédure de reroutage s'effectue instantanément pour sauvegarder le trafic perturbé par cette panne, le reroutage consiste à chercher les routes (arcs système) alternatives disposant d'une capacité résiduelle pour faire passer sur le réseau de réserve le trafic perturbé.
- ✓ **Rétablissement par commutation N+1 :** dans le cas d'une panne système, le reroutage peut avoir lieu sur le même arc système (ou le même câble), Le système perturbé est automatiquement commuté sur un système de réserve. Cette technique de protection est appelée N+1 (un système de réserve pour N systèmes en fonctionnement).



**Figure III. 1 :** sécurisation par N+1

### III .3 La stratégie de reroutage :

- ✓ **Le reroutage global :** appelé reroutage de bout en bout, il consiste à rerouter le trafic perturbé à partir des extrémités des nœuds perturbés. Il est souvent utilisé lorsque plusieurs arcs systèmes sont en panne (pannes multiples).

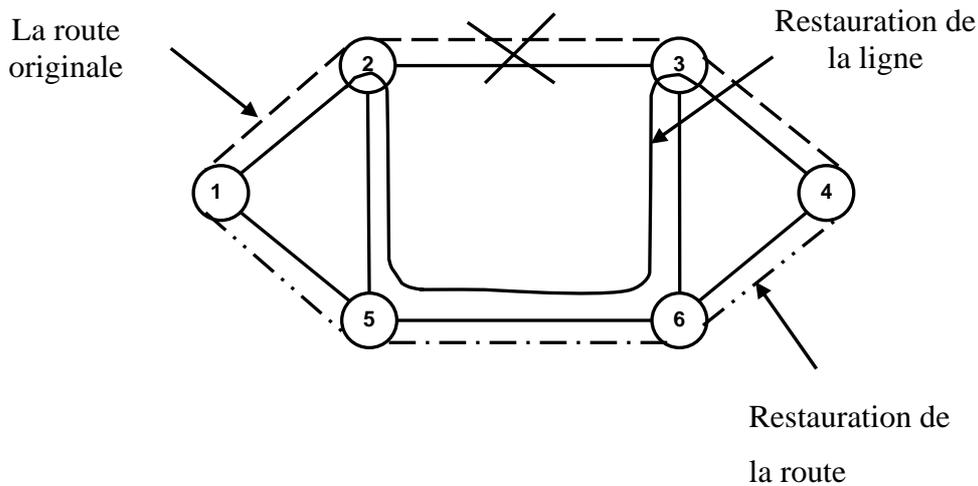
Les avantages sont de permettre la récupération de la capacité utilisée par une demande sur sa route nominale, de traiter différemment les demandes, et d'avoir une adaptation plus facile en cas de panne de nœud, l'inconvénient se trouve dans la complexité du temps de calcul.

- ✓ **Le reroutage local :** permet de rerouter les trafics perturbés à partir de l'arc système en panne par les routes alternatives les plus courtes en essayant de récupérer le trafic perturbé à l'aide de leurs capacités résiduelles.

Ce reroutage présente des avantages telle que sa vitesse et sa simplicité d'implantation, cependant des trafics peuvent effectuer des aller retour sur un même arc. De plus la réalisation des capacités résiduelles est difficile cela devient très complexe dans le cas de pannes multiples et surtout pour les pannes de nœuds pour cette raison, nous effectuons le reroutage local en cas d'un seul arc système en panne (panne simple).

On choisit le multiroutage pour le reroutage local, et le monoroutage pour le reroutage global en raison du temps de calcul.

La restauration d'une ligne correspond au reroutage local et la restauration d'une route correspond au reroutage global.



**Figure III. 2 :** La différence entre la restauration de la ligne (local) et la restauration de la route (globale)

- ✓ **Reroutage total :** consiste à rerouter la totalité du trafic perturbé. En pratique ce type de reroutage reste irréalisable à cause de la limite des capacités du réseau de réserve.
- ✓ **Reroutage partiel :** il consiste à ne rerouter qu'une partie du trafic perturbé.
- **Les sortes de reroutage selon le type de contrôle utilisé :** On distingue le reroutage centralisé et le reroutage distribué.
  - **Le reroutage centralisé :** le réseau est géré par un processeur central, qui contrôle le reroutage, s'il y a des pannes, les nœuds qui détectent ces pannes envoient des informations vers le processeur central, ce dernier collecte toutes ces informations en suite en ce fondant sur sa connaissance global du réseau, il calcul et distribue des tables de reroutage pour récupérer au maximum le trafic perturbé par ces pannes.
  - **Le reroutage distribué :** le contrôle du reroutage est assuré localement par chaque nœud du réseau.

A première vue le reroutage centralisé présente des avantages puisque le processeur central a une information complète, il peut prendre des décisions parfaites, un autre avantage est qu'il soulage tous les nœuds du fardeau des calculs de reroutage, toutefois, le reroutage centralisé présente quelques inconvénients : tout d'abord la communication entre les nœuds et le processeur

central doit être très fiable. Ensuite la distribution des tables de reroutage, les nœuds les plus proches du processeur central recevront leurs nouvelles tables en premier et commuteront sur ces nouvelles routes avant que les nœuds éloignés aient reçu leurs propres tables, cela peut provoquer une incohérence du réseau. Un problème plus grave est la vulnérabilité du processeur central. S'il tombe en panne ou s'il se trouve isolé par des ruptures de ligne, pendant quelques instants le sous réseau peut devenir hors service.

Par contre, le reroutage distribué élimine tous ces problèmes, il est plus rapide car le reroutage est assuré localement par chaque nœud, toutefois la communication entre les nœuds doit être fiable.

**III .4 Les méthodes de reroutage :** on distingue les méthodes précalculées et les méthodes dynamiques.

◆ **Les méthodes précalculées :**

Les méthodes précalculées gardent les tables de reroutage dans un processeur central ou dans chaque nœud. En face d'une panne, ces méthodes emploient des tables de reroutage prédéterminées et nécessitent une planification stricte des capacités résiduelles, l'implantation de ces méthodes pose les problèmes suivants :

Le reroutage doit être satisfaisant.

L'intégration des données demande beaucoup de mémoire.

La commutation des données doit être fiable.

L'impossibilité de précalculer toutes les pannes qui rend préférable le calcul du reroutage en chaque nœud en temps réel.

Les avantages : sa simplicité d'implantation, sa vitesse d'exécution.

◆ **Les méthodes dynamiques :**

Ces méthodes utilisent l'état courant du réseau pour calculer le reroutage, dès qu'une panne se produit. La plupart des méthodes qui utilisent un contrôle distribué implémentent une méthode de reroutage dynamique. L'avantage est de bien identifier les arcs ou nœuds en panne et donc de les éviter pendant la sélection des routes alternatives.

Les inconvénients sont la complexité d'implantation et une vitesse plus petite que dans le cas précédent.

### III .5 Etapes principales des algorithmes de reroutage :

En réponse à une panne, le processus de reroutage est constitué des étapes suivantes :

- **Détection :**

La détection des pannes pose un problème sérieux. Il s'agit de bien détecter et distinguer les pannes des nœuds des pannes des arcs. Les nœuds peuvent détecter si un signal n'aboutit pas au nœud successeur, mais ils ne peuvent pas distinguer s'il s'agit d'une panne d'arc ou d'une panne de nœud.

- **Mise au courant des autres éléments du réseau, et début de reroutage :**

Dès qu'une panne se produit, les nœuds extrémités envoient à leurs voisins des messages pour les prévenir de la panne. Chaque nœud qui reçoit un tel message, le transmet à son tour à tous ses voisins pour mettre au courant tous les nœuds de l'état du réseau.

- **La sélection des chemins :**

La sélection des chemins peut être faite sous contrôle centralisé ou sous contrôle distribué, et cela, en employant soit les tables précalculées soit les méthodes dynamiques.

- **Reroutage :**

Rerouter les demandes par les chemins trouvés auparavant, selon la stratégie choisie (reroutage global ou reroutage local).

- **Retour à l'état nominal après la réparation :**

Après réparation de la panne, on revient à l'état initial.

### III .6 Algorithme des plus courts chemins :

Pour pouvoir rerouter le trafic perdu nous cherchons le plus court chemin sur le réseau logique, qu'on représente par un graphe  $G(N, E)$  évalué, où  $N$  est l'ensemble des sommets correspondant au nœud de transmission, et  $E$  l'ensemble des arcs correspond aux arcs systèmes, le chemin dans notre cas est la suite d'arcs systèmes, sa valeur s'obtient soit par l'addition des valuations des arcs qui les constituent comme dans le cas des algorithmes de Bellman et Dijkstra soit par le nombre d'arcs comme l'Algorithme qu'on va détailler par la suite.

Dressons la liste de tous les plus courts chemins que l'on peut calculer dans un graphe.

**Plus court chemin à origine unique :** On part d'un sommet du graphe et on veut établir tous les plus courts chemins vers tous les autres sommets du graphe.

**Plus court chemin pour deux sommets :** On cherche le plus court chemin entre deux sommets du graphe.

**Plus court chemin pour tout couple de sommets :** On cherche le plus court chemin entre tous les couples de sommet du graphe.

**Plus court chemin à destination unique :** On cherche le plus court chemin en partant de tous les sommets du graphe, pour arriver à un sommet donné.

En fait, cela revient à l'inverse du plus court chemin à origine unique (ou lieu de partir d'un sommet pour aller vers tous les sommets, on part de tous les sommets pour aller vers un sommet).

### III .6.1 Les algorithmes utilisant l'addition des valuations des arcs :

#### ✓ Algorithme de Floyd :

Il s'agit ici de calculer, pour tout sommet  $x$  et tout sommet  $y$ , la valeur minimale des chemins de  $x$  à  $y$ , notée  $m(x, y)$ . C'est un algorithme applicable pour tous les cas. De plus, cet algorithme peut gérer le routage, déterminer l'ordre dans lequel les sommets sont visités.

Supposant que les sommets soient numérotés  $1, 2, \dots, n$ . Le graphe est composé de l'ensemble fini de ces sommets, et d'un ensemble de couples de sommets appelés ensemble des arcs. Chaque arc  $(x, y)$  est doté d'une valeur notée  $v(x, y)$ . Initialement, on a pour tout couple de sommets  $(x, y)$ , les valeurs  $m(x, y) = v(x, y)$  si l'arc  $(x, y)$  existe (cet arc correspond à un chemin de longueur 1, c'est-à-dire allant directement de  $x$  à  $y$  sans passer par un autre sommet), ou  $m(x, y) = +\infty$  si l'arc est inexistant.  $M(x, y) = 1$

- **Une première opération, nommée O1 :** va calculer, pour chacun des couples de sommets (x, y), la valeur minimum des chemins de x à y entre celui de longueur 1 (l'arc (x, y)) et celui de longueur 2, sans répétition, passant par le sommet numéro 1, c'est-à-dire le chemin (x, 1, y). cette opération est très simple : elle consiste à calculer, pour tout x et pour tout y, la valeur  $m(x, y) = \min (m(x, y), m(x, 1) + m(1, y))$ .

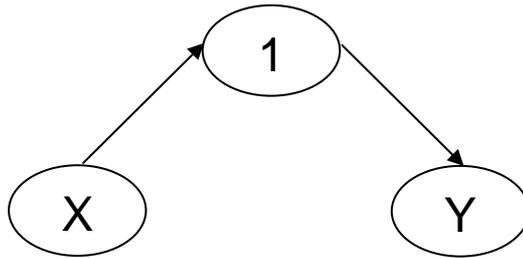


Figure III.3

- **Puis une deuxième opération, nommée O2 :** va calculer, pour chacun des couples de sommets (x, y), la valeur minimum des chemins de x à y parmi ceux de longueur 1 (l'arc (x, y)), ceux de longueur 2, sans répétition, passant par les sommets numéro 1 ou 2, c'est-à-dire (x, 1, y) et (x, 2, y), et ceux de longueur 3, sans répétition, passant par les sommets 1 et 2 c'est-à-dire les chemins (x, 1, 2, y) et (x, 2, 1, y). Elle consiste à calculer, pour tout x et pour tout y, la valeur  $m(x, y) = \min (m(x, y), m(x, 2) + m(2, y))$ . avec m(.) mise à jour avec O1.

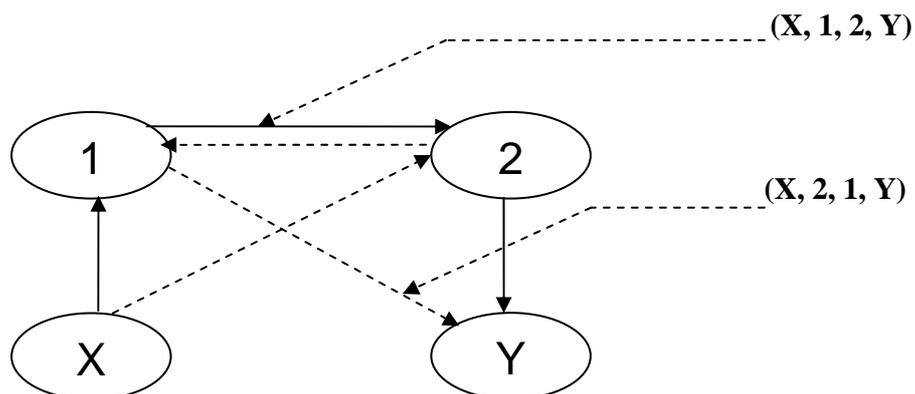


Figure III.4

Et ainsi de suite, avec les opérations O3, ..., Ok, ..., On.

On peut voir que, à l'issue de Ok (1=k=n) chaque valeur  $m(x, y)$  est la valeur minimum des chemins de x à y, sans répétition, passant par les sommets intermédiaires de numéro = k (ces chemins sont donc de longueur = k+1).

Par conséquent, à l'issue de  $n$ , les valeurs  $m(x, y)$  prennent en compte l'ensemble de tous les chemins sans répétition allant de  $x$  à  $y$  (tous les sommets intermédiaires possibles sont pris en compte).

S'il n'y a pas de circuit absorbant, ces valeurs sont correctes. S'il ya des circuits absorbants (de valeur  $< 0$ ), ils sont détectés, puisque pour chaque sommet  $x$  appartenant à un tel circuit, on a  $m(x, x) < 0$ .

L'algorithme de Floyd est l'un des simples à mettre en œuvre, mais n'est pas le moins coûteux.

#### ✓ Algorithme de Bellman :

Les algorithmes des plus courts chemins d'un nœud source vers les autres nœuds dans un réseau modélisé par un graphe sont ceux de Bellman (1957) et de Ford (1962). Cet algorithme connu aussi sous le nom de Bellman-Ford, consiste à :

- 1) Numéroté arbitrairement de 1 à  $n$  les sommets du graphe, avec précision du sommet source.
- 2) On désigne par  $V(i, j)$  la valuation (le coût)  $V(x_i, x_j)$  de l'arc  $(x_i, x_j)$  lorsque cet arc appartient à l'ensemble des arcs du graphe. En outre, et par convention, on pose :

$V(i, j) = \infty$  si  $i$  n'est pas connecté directement à  $j$ , c'est-à-dire si la liaison entre  $i$  et  $j$  n'existe pas.

$V(i, j) = 0$  pour  $i = j$ .

$D_i^L = 0 \quad \forall L$

- 3) pour  $L=0$  poser :  $D_i^L = \infty$  Pour les  $n$  nœuds et  $i \neq 1$

- 4) A l'étape  $L$  ( $L > 1$ ) de l'algorithme, calculer :

$$D_i^L = \min [V(i, j) + D_j^{(L-1)}]$$

$D_i^L$  étant la valeur minimale du chemin d'au plus  $L$  arcs entre  $x_1$  et  $x_i$ .

- 5) Arrêter d'appliquer l'algorithme dès que  $D_i^{L+1} = D_i^L$  pour  $i = 1 \dots n$  ce qui se produira nécessairement pour  $L \leq n-1$ .

L'algorithme fournit la valeur minimale entre  $x_1$  et  $x_i$  ( $i=2, \dots, n$ ).

#### ✓ Algorithme de Dijkstra :

Il concerne les graphes orienté dont les poids des arcs sont positifs et fournit la valeur minimale du (ou des) chemins entre un sommet donné et tous les autres sommets du graphe

c'est-à-dire on se fixe un sommet source et Dijkstra donne tous les chemins les plus courts de ce sommet vers chacun des autres sommets.

Pour les besoins des calculs, on va créer deux ensembles C et D, C contient les sommets vers lesquels la plus petite courte distance n'a pas encore été calculée c'est à-dire l'ensemble des sommets qui restent à visiter.

Au départ :  $C = S - \{\text{source}\}$ .

D contient tous les sommets pour lesquels on connaît déjà leur plus petite distance à la source.

Au départ :  $D = \{\text{source}\}$ .

Pour chaque sommet s dans D on crée aussi deux tableaux, on appellera le premier d (pour distance) dans lequel on met le poids du plus court chemin jusqu'à la source et le second pred (pour prédécesseur) pour mettre le sommet p qui précède un autre sommet s dans un plus court chemin vers la source. Ainsi, pour retrouver le chemin le plus court, il suffira de remonter de prédécesseur en prédécesseur jusqu'à la source.

Désignant par  $V(i, j)$  la valuation (poids) de l'arc  $(x_i, x_j)$  lorsque cet arc appartient à l'ensemble des arcs du graphe, par convention, on pose :

$V(i, j) = +\infty$  si l'arc  $(x_i, x_j)$  n'existe pas

$V(i, j) = 0$  pour  $i=j$

En suite on suit les étapes suivantes :

1)  $C = \{x_i / x_i \text{ est un sommet du graphe à l'exception de l'origine}\}$

$D = \{x_1\}$

$d(x_i) = \{V(1, i)\}$  pour tout  $x_i \in C$ .

$\text{Pred}(x_i) = \{x_1\}$  pour tous les sommets du graphe

2) prendre  $x_i \in C$  pour qui la valeur dans d est la plus petite et différente de l'infini.

3) Ajouter  $x_i$  à D, soustraire  $x_i$  de C

4) Remplacer  $d(x_i)$  par la nouvelle valeur  $[d(x_i) + V(i, j)]$  si celle-ci est inférieure à l'ancienne qui est déjà vu dans d, mettre  $x_i$  dans pred. Puis l'on revient à 2) jusqu'à ce que la condition ne soit plus vérifiée. L'algorithme se termine lorsque C est vide.

**Organigramme de Dijkstra :**

$C = \{x_i / x_i \notin D\}$   
 $D = \{x_1\}$   
 $d(x_i) = 0$   
 $d(x_i) = V(x_1, x_i) \quad i = 2 \dots n$   
 $\text{Pred}(x_i) = 1$

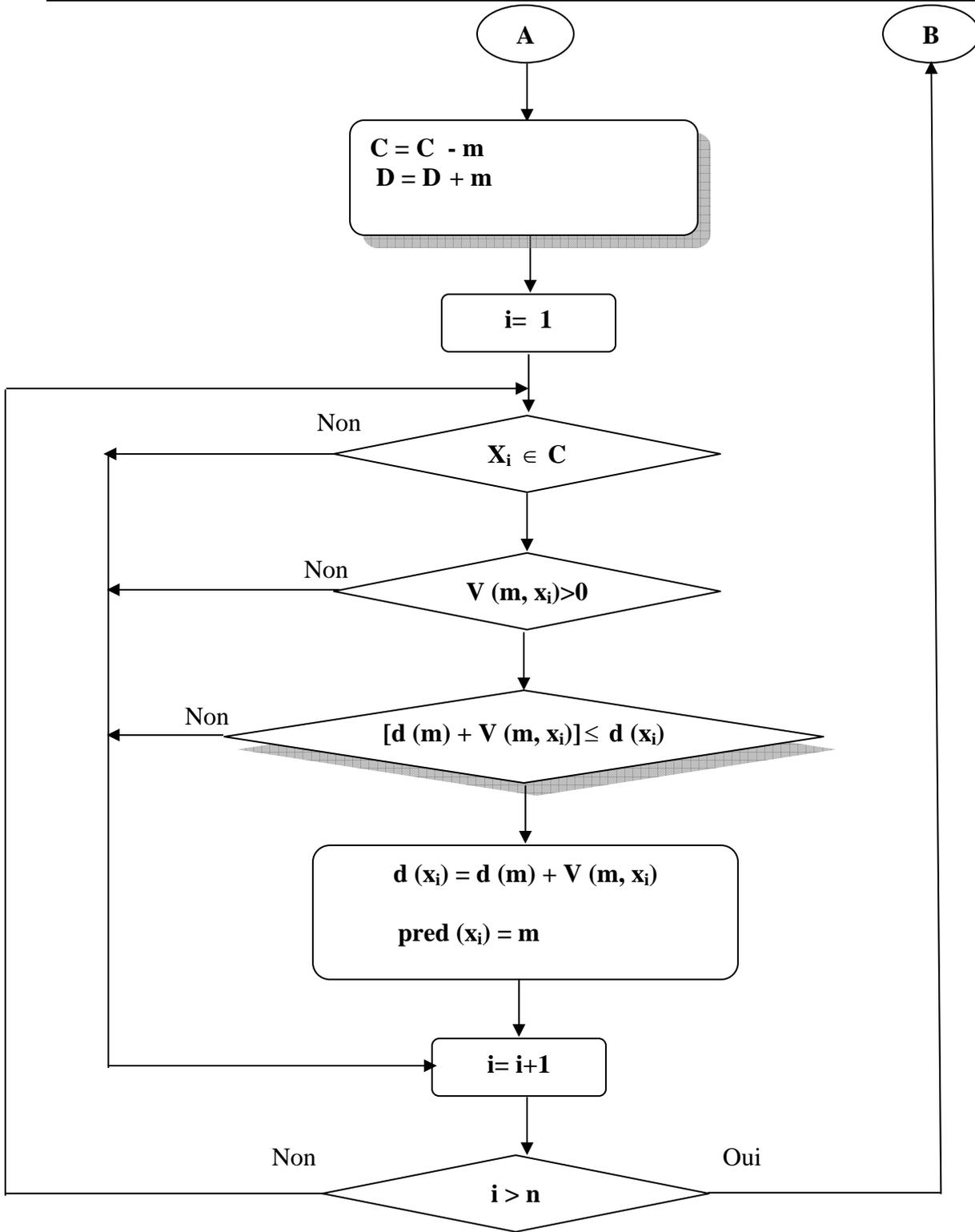
Non

Non

Non

Non

Oui



# Chapitre IV :

*Programmation de  
L'algorithme de recherche et de  
stockage des plus courts  
chemins en nombre d'arcs*

## **IV. 1 Introduction :**

Le reroutage s'applique en cas des pannes d'un ou plusieurs arcs systèmes, et consiste à trouver des chemins alternatifs pour le trafic perturbé à partir de deux nœuds  $i$  et  $j$ .

Dans la résolution du problème de reroutage, nous avons utilisé une heuristique basée sur les plus courts chemins en nombre d'arcs disposant d'une capacité résiduelle, limité à une longueur  $L$  (souvent  $L \leq 5$ ). En fait nous cherchons d'abord des longueurs inférieures à  $L$  entre  $i$  et  $j$  nous les ordonnons selon leurs longueurs (en nombre d'arcs), en suite nous les stockons dans une structure de données, afin de pouvoir accéder à un chemin de longueur fixe le plus vite possible.

Dans ce chapitre nous donnons le principe de l'algorithme de recherche et de stockage de ces plus courts chemins avec des exemples explicatifs programmés sous langage Delphi.

## **IV. 2 Algorithme de recherche et stockage des plus courts chemins :**

### **IV. 2.1 Principe général :**

Nous considérons un graphe non orienté  $G = (V, E)$ , où  $V$  est l'ensemble des sommets et  $E$  l'ensemble des arcs. Nous supposons que les sommets sont numérotés  $1, 2, \dots, N$ . Soit  $L$  une constante donnée. Nous supposons aussi que la constante  $L$  n'est pas très grande, par exemple,  $L \leq 3$ .

Il faut chercher les chemins élémentaires de  $i$  à  $j$  de longueur inférieure ou égale à  $L$  pour toutes les paires  $(i, j)$  de sommet de  $G$  et les stocker en longueur croissante.

En fait, nous pouvons d'abord chercher les chemins élémentaires de  $j$  à  $i$  de longueur inférieure ou égal à  $L$  de tous les sommets à un sommet fixé du graphe, puis les stocker en longueur croissante. En suite, en appelant cet algorithme pour chaque sommet du graphe, nous pouvons résoudre le problème ci-dessus :

Dans notre étude, le graphe considéré est non orienté. En conséquence, les chemins de  $j$  à  $i$  sont identiques à ceux de  $i$  à  $j$ . Nous pouvons donc nous limiter au problème de trouver les chemins élémentaire de longueur inférieure ou égale à  $L$  du sommet  $j$  au sommet  $i$ , avec  $j > i$ .

## IV .2.2 Les étapes de l'algorithme :

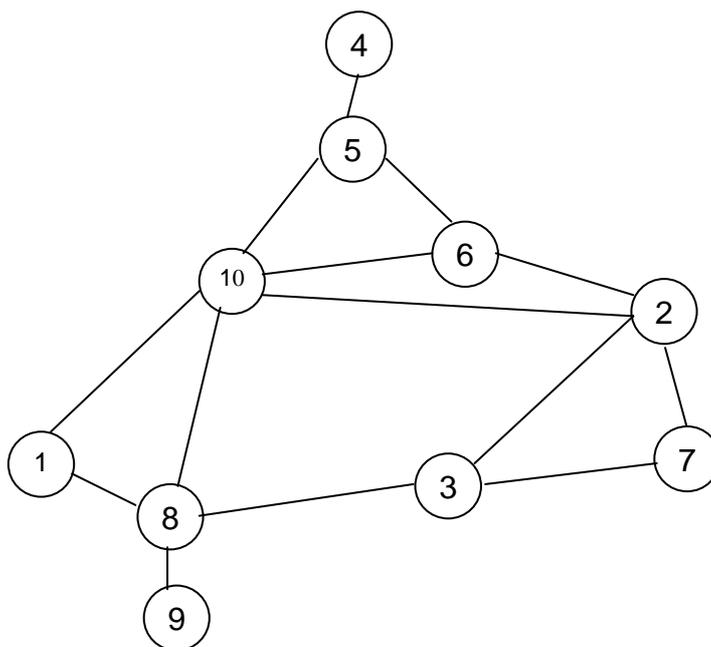
L'algorithme se décompose en deux étapes :

**Etape 1 :** rechercher les chemins élémentaires du graphe du sommet  $j$  au sommet  $i$  ( $i$  fixé) de longueur inférieure ou égale à  $L$  ;

**Etape 2 :** créer une structure de données pour stocker dans l'ordre des longueurs croissantes tous les chemins de  $j$  à  $i$  ( $j > i$ ).

L'étape 1 est accomplie en développant en largeur une arborescence inverse. Cette arborescence représente tous les chemins de  $j$  à  $i$  de longueur maximale  $L$ .

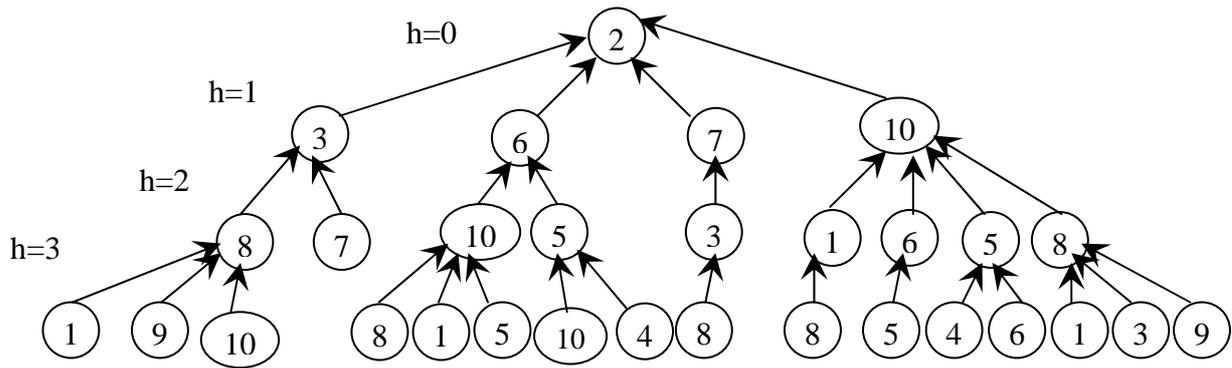
**Exemple :**



**Figure IV. 1 :** graphe G

La **figure IV .1** représente un graphe non-orienté où  $N=10$ , nous prendrons  $L = 3$ .

L'arborescence en inverse, qui représente les chemins de longueur maximum 3 de tous les sommets au sommet 2, est la suivante :



**Figure IV.2:** l'arborescence en largeur

L'idée de l'étape deux est d'associer à chaque sommet  $k$  les ensembles de sommets notés  $L_i^k(m)$  ( $m= 1,2,\dots,L$ ) définis ainsi :

$L_i^k(m) = \{ \text{l'ensemble des successeurs de } k \text{ à partir desquels nous pouvons atteindre } i \text{ par un chemin de longueur } m-1 \}$ , avec  $m = 1, 2, \dots, L$  ;  $k$  est un sommet dans l'arborescence de l'étape 1.

En particulier :

$$L_i^k(1) = \{i\}, \text{ si } i \text{ est un successeur de } k .$$

$$L_i^i(m) = \phi.$$

Nous calculons  $L_i^k(m)$  dans l'arborescence établie à l'étape 1 (figureIV.2) dans l'ordre de la recherche en largeur à partir de chaque feuille  $k$ , avec  $k>i$ . Lors de la recherche, nous rencontrons le sommet  $i_h$  à la profondeur  $h$  dont le successeur est le sommet  $i_{h-1}$  à la profondeur  $h-1$ . Nous mettons alors  $i_{h-1}$  dans l'ensemble  $L_i^{i_h}(h)$  correspond au sommet  $i_h$ .

Ainsi, à la fin du parcours de l'arborescence, nous obtenons  $L_i^k(m)$  pour chaque sommet  $k$  ( $k \neq i$ ) de l'arborescence.

En suite, nous expliquons comment obtenir un chemin de  $j$  à  $i$  ( $j>i$ ) de longueur  $h$ , noté  $j=j_0, j_1, \dots, j_{h-1}, j_h = i$  à l'aide des ensembles  $L_i^k(m)$ .

Pour construire un tel chemin, nous commençons par le sommet  $j$ . Nous lisons d'abord  $L_i^j(h)$  et nous avons  $j_1$ , puis nous lisons  $L_i^{j_1}(h-1)$  et nous obtenons  $j_2$ . Ainsi de suite, nous pouvons trouver tous les sommets sur ce chemin.

Par exemple, pour la figure IV.2 nous calculons pour les nœuds de l'arborescence à la profondeur 3, nous obtenons alors :

$$L_2^{10}(3) = \{8,5\}, L_2^9(3) = \{8\}, L_2^8(3) = \{10, 3, 1\}, L_2^6(3) = \{5\}, L_2^5(3) = \{10,6\}, \\ L_2^4(3) = \{5\}, L_2^3(3) = \{8\}.$$

A la profondeur 2, nous avons de même :

$$L_2^{10}(2) = \{6\}, L_2^8(2) = \{3,10\}, L_2^7(2) = \{3\}, L_2^6(2) = \{10\}, L_2^5(2) = \{6,10\}, L_2^3(2) = \{7\}, \\ L_2^1(2) = \{10\}.$$

A la profondeur 1, nous avons :

$$L_2^{10}(1) = \{2\}, L_2^7(1) = \{2\}, L_2^6(1) = \{2\}, L_2^3(1) = \{2\}.$$

A partir de ces ensembles, nous pouvons trouver tous les chemins élémentaires de  $j$  à 2 ( $j > 2$ ) de longueur maximum 3. Par exemple, nous voulons les chemins de 10 à 2.

Pour rechercher les chemins de 10 à 2 de longueur 1, nous lisons  $L_2^{10}(1) = \{2\}$ , il existe alors un arc : 10->2.

Pour rechercher les chemins de 10 à 2 de longueur 2, nous lisons  $L_2^{10}(2) = \{6\}$ ,  $L_2^6(1) = \{2\}$ .

Nous avons donc un chemin : 10->6->2.

Pour rechercher les chemins de 10 à 2 de longueur 3, nous lisons  $L_2^{10}(3) = \{8,5\}$ ,  $L_2^8(2) = \{3, 10\}$ ,  $L_2^3(1) = \{1\}$ , nous avons alors le premier chemin 10->8->3->2, nous lisons  $L_2^5(2) = \{6, 10\}$ ,  $L_2^6(1) = \{2\}$ , nous avons le deuxième chemin 10->5->6->2. Parce que le graphe G est non orienté, nous avons également obtenu les deux autres chemins : 2->3->8->10 et 2->6->5->10.

## *Conclusion générale*

L'objectif de cette thèse est de cerner les différentes approches employées pour estimer un réseau fiable et sécurisé contre des pannes portant principalement sur les liaisons, éléments les plus vulnérables d'un réseau.

A cet effet nous avons étudié quelques méthodes d'évaluation de la fiabilité, la méthode fondée sur les chaînes de Markov, la méthode d'énumération des états les plus probables, la méthode d'énumération complète des états et la méthode de simplification de graphe. Les mesures évaluées sont la disponibilité et le trafic perdu moyen en cas des pannes. Une démarche à deux étapes ont été choisie :

- Évaluation des conséquences d'une panne ou de plusieurs pannes par des processus de reroutage (nous nous sommes intéressé au reroutage selon le nombre d'arcs).
- Le calcul probabiliste pour évaluer la disponibilité et le trafic perdu moyen.

Néanmoins, il reste des facteurs non pris en compte comme les pannes des nœuds, des taux de réparation et de défaillance des composants non constant et un autre point important est que nous avons émis l'hypothèse d'indépendance des pannes, hypothèse trop forte pour caractériser les performances réelles d'un réseau de télécommunication. En effet une coupure d'artère entraîne bien souvent une panne de système. Il serait intéressant d'estimer l'effet sur les résultats en tenant compte des dépendances des pannes et de faire les calculs avec des méthodes moins restrictives ( $\lambda$  et  $\mu$  varient en fonction du temps).

## *Bibliographie*

- **[1] D. Messaoudi, C. Lac et A. M'Hamed :**

Les modèles de fiabilité des réseaux de télécommunication. Edition Evry, France, 1996.

- **[2] Pagèse Coondron Magnien :**

Fiabilité des systèmes. Editions Eyrolles, 1980.

- **[3] Nikolaos Limnios :**

Arbre de défaillance. Edition Hermès, 2005.

- **[4] MC Belaid :**

Programmer les bases de données avec Delphi. Edition pages bleues Internationales et Bleues Lignes Edition et Distribution, 2005.

- **[5] Frédérique Beaulieu :**

Programmation orientée objet. Editions Berti, 2004.

- **[6] O. Hamdad-Amroun, C, Lac et A. Mhamed :**

Étude de disponibilité d'un réseau d'interconnexion .Evry France. 1995.

- **[7] Yu Liu :**

Étude et calcul de la fiabilité des réseaux de télécommunication, thèse de doctorat. Université de Compiègne. France 1993.

- **[8] F.Challali et T. Yebbal :**

Sûreté de fonctionnement d'un réseau de télécommunication, thèse d'ingénieur en électronique. UMMTO 2002-2003.

- **[9] H. Chaouche et D. Kadouche :**

Sécurité réseaux, mémoire ingénieur en électronique. UMMTO 2002-2003.

- **[10] H. Rebai :**

Conception d'une interface de communication entre un abonné de réseau téléphonique commuté RTC et un abonné du réseau numérique à intégration de service (RNIS), mémoire Ingénieur en électronique. Ecole national polytechnique, 2002.

## *Sites d'internet :*

[www.irisa.fr](http://www.irisa.fr)

[www.inria.fr](http://www.inria.fr)

[www.rd.francetelecom.fr](http://www.rd.francetelecom.fr)

[www.commentcamarche.doc](http://www.commentcamarche.doc)

[file:///H:/Algorithme de dijkstra.htm](file:///H:/Algorithme%20de%20dijkstra.htm)

[file:///G:/pluscourt chemin.htm](file:///G:/pluscourt%20chemin.htm)